



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## HODNOCENÍ OSLNĚNÍ EXTERIÉROVÝCH OSVĚTLOVACÍCH SOUSTAV

GLARE EVALUATION OF EXTERIOR LIGHTING SYSTEMS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Dominik Rampák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Škoda, Ph.D.

BRNO 2021

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** Bc. Dominik Rampák

**ID:** 182814

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2020/21

**NÁZEV TÉMATU:**

## Hodnocení oslnění exteriérových osvětlovacích soustav

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Literární rešerše z oblasti oslnění
2. Experimentální terénní měření
3. Simulace osvětlovací soustavy v počítači
4. Porovnání výsledků

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

podle pokynů vedoucího diplomové práce

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 24.5.2021

**Vedoucí práce:** Ing. Jan Škoda, Ph.D.

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Dôležitým ale často opomínaným faktorom pri návrhu osvetľovacích sústav je oslnenie. Tento parameter môže výrazne ovplyvňovať ľudský biorytmus, spôsobovať pocit nepohody a v najhoršom prípade až oslnenie vodičov, ktoré môže viesť k dopravným nehodám. Preto je nevyhnutné aby sa pri návrhu osvetľovacích sústav uvažovalo aj s oslnením, konkrétne s hodnotou prahového prírastku.

Práca je zameraná na hodnotenie oslnenia spôsobeného exteriérovými osvetľovacími sústavami a porovnanie využiteľnosti rôznych objektívov pri zisťovaní prahového prírastku pomocou jasového analyzátora. Pre lepšie pochopenie celej problematiky je v práci popísaný spôsob akým ľudské oko vníma svetlo, na čo nadväzuje definovanie oslnenia a jeho rozdelenie. Následne je v práci uvedený podrobný postup výpočtu prahového prírastku na komunikácii, ktorý slúži ako podklad k praktickej časti.

Praktická časť práce je venovaná experimentálnemu meraniu exteriérovej osvetľovacej sústavy na ulici Technická za budovou VUT FEKT T12. Na zachytenie scény je využívaný jasový analyzátor a program LumiDISP, pričom na zachytenie scény sú použité 3 rôzne objektívy. Výstupom tejto práce sú hodnoty prahového prírastku získané pomocou 4 spôsobov merania (3 objektívov) a následné porovnanie vhodnosti využitia jednotlivých objektívov na zisťovanie oslnenia. Pre doplnenie je vytvorená simulácia meranej osvetľovacej sústavy v programe Relux a následné porovnanie výsledkov s nameranými hodnotami.

## **Kľúčové slová**

Vnímanie svetla, oslnenie, jas, jasový analyzátor, komunikácia, prahový prírastok ( $f_{TI}$ )

## **Abstract**

Glare is an important, but often overlooked parameter in lighting systems design. This parameter can significantly affect human biorhythm, causing a discomfort or in the worst cases it can dazzle drivers, which can lead to car accidents. Therefore, it's necessary for lighting designers to consider glare in their designs, specifically threshold increment value.

This thesis focuses on glare measurement caused by exterior lighting systems and comparison of usage different types of camera lens for threshold increment measurements with luminance analyser. For a better understanding of the whole issue, there is a part describing how human eye perceives light, which is followed by definition and division of the glare. Afterwards, there is part describing calculation procedure of the threshold increment, which serves as a basis for the practical part of the thesis.

Practical part of the thesis is dedicated to experimental measurement of glare from exterior lighting system on Technická street, right behind VUT FEKT T12 building. The measurement is done using luminance analyser and the LumiDISP program, while 3 lenses are used for the measurements. The output of this thesis are values of threshold increment obtained by using 4 different methods (3 lenses) and subsequent comparison of the suitability of the lenses for the glare measurements. To supplement, a simulation of the measured lighting system in the Relux program and a subsequent comparison of the results with the measured values are performed.

## **Keywords**

Light perception, glare, luminance, luminance analyser, road, threshold increment ( $f_{TI}$ )

## **Bibliografická citácia:**

RAMPÁK, Dominik. *Hodnocení oslnění exteriérových osvětlovacích soustav* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134913>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Jan Škoda.

## Prehlásenie autora o pôvodnosti diela

<b>Meno a priezvisko študenta:</b>	<i>Bc. Dominik Rampák</i>
<b>VUT ID študenta:</b>	<i>182814</i>
<b>Typ práce:</b>	<i>Diplomová práca</i>
<b>Akademický rok:</b>	<i>2020/21</i>
<b>Téma záverečnej práce:</b>	<i>Hodnocení oslnění exteriérových osvětlovacích soustav</i>

Prehlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho záverečnej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov pri porušení ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníku č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa: 24.5.2021

-----  
podpis autora

## **Pod'akovanie**

Rád by som poďakoval vedúcemu diplomovej práce Ing. Janovi Škodovi, Ph.D., za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci.

V Brne dňa: 24.05.2021

.....  
podpis autora

---

# OBSAH

<b>ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK .....</b>	<b>10</b>
<b>ZOZNAM OBRÁZKOV .....</b>	<b>12</b>
<b>ZOZNAM TABULIEK .....</b>	<b>13</b>
<b>ZOZNAM PRÍLOH.....</b>	<b>13</b>
<b>1. ÚVOD.....</b>	<b>14</b>
<b>2. SVETELNOTECHNICKÉ VELIČINY .....</b>	<b>15</b>
2.1 SVETELNÝ TOK.....	15
2.2 PRIESTOROVÝ UHOL .....	15
2.3 SVIETIVOSŤ .....	17
2.4 OSVETLENOSŤ.....	18
2.5 JAS ZVÄZKU SVETELNÝCH LÚČOV .....	18
2.5.1 Jas pozadia .....	19
2.5.2 Ekvivalentný závojový jas .....	20
<b>3. OKO A VNÍMANIE SVETLA.....</b>	<b>22</b>
3.1 FENOMÉN SUMÁCIE .....	22
3.2 AKTIVITA HORIZONTÁLNYCH, BIPOLÁRNYCH A AMAKRINNÝCH BUNIEK .....	23
3.3 FUNKCIA GANGLIOVÝCH BUNIEK .....	23
3.4 MECHANIZMUS VNÍMANIA .....	24
<b>4. OSLNENIE .....</b>	<b>27</b>
4.1 DEFINÍCIA .....	27
4.1.1 Priame oslnenie .....	27
4.1.2 Oslnenie odrazom (nepriame).....	27
4.1.3 Prechodové oslnenie .....	28
4.1.4 Závojové oslnenie.....	28
4.1.5 Oslnenie kontrastom .....	29
4.2 HODNOTENIE OSLNENIA NA KOMUNIKÁCIÁCH .....	30
4.3 PRAKTICKÉ MERANIE HODNOTY $F_{TI}$ POMOCOU METÓDY ILMD.....	35
<b>5. MERANIE OSLNENIA.....</b>	<b>37</b>
5.1 JASOVÝ ANALYZÁTOR.....	37
5.2 LUMIDISP.....	37
5.3 URČENIE POĽA PRE MERANIE ROZLOŽENIA JASU NA KOMUNIKÁCIÍ .....	37
5.4 SVIETIDLÁ ZAHRNUTÉ DO VÝPOČTU.....	39
<b>6. EXPERIMENTÁLNE MERANIE OSLNENIA.....</b>	<b>40</b>
6.1 POSTUP MERANIA .....	40
6.2 SPRACOVANIE MERANIA.....	41
6.2.1 Objektív 135 mm .....	41
6.2.2 Objektív 50 mm .....	44



---

6.2.3	<i>Objektív 4,5 mm (Fish Eye)</i> .....	49
6.3	ZHODNOTENIE MERANIA .....	52
6.4	POROVNANIE OBJEKTÍVOV .....	54
6.5	SIMULÁCIA.....	55
<b>7.</b>	<b>ZÁVER</b> .....	<b>58</b>
7.1	ZÁVERY PRÁCE .....	58
7.2	NÁVRH ĎALŠIEHO POKRAČOVANIA .....	59
	<b>POUŽITÁ LITERATÚRA</b> .....	<b>60</b>
	<b>PRÍLOHY</b> .....	<b>62</b>

## Zoznam symbolov a skratiek

Skratka	Význam	
CIE	Medzinárodná komisia pre osvetľovanie	
ILMD	zariadenia merajúce jas zo snímok	
LED	dióda emitujúca svetlo	
ISO	citlivosť snímača fotoaparátu na svetlo	
HDR	vysoký dynamický rozsah zobrazovanej scény	
Symbol	Význam	Jednotka
$\beta$	uhol zvierajúci normála roviny $\rho$ s lúčom $l$	[°]
$\vartheta_{zd}$	uhol medzi smerom pohľadu pozorovateľa a smerom spojnice svetelného streda svietidla	[°]
$\lambda$	vlnová dĺžka	[m]
$\rho$	priemerný činiteľ odrazu prostredia	[-]
$\phi$	svetelný tok	[lm]
$\phi_e$	žiarivý tok	[W]
$\Omega$	priestorový uhol	[sr]
$\Omega_{\gamma\zeta}$	priestorový uhol, ktorého os leží v smere určenom uhlami $\gamma$ a $\zeta$	[sr]
$\Omega_{max}$	maximálny priestorový uhol	[sr]
$A$	plocha na povrchu gule	[m <sup>2</sup> ]
$A_p$	plocha priemetu svietidla	[m <sup>2</sup> ]
$c$	činiteľ závislý na jase $L_z$	[-]
$E$	osvetlenosť	[lx]
$E_i$	nepriama osvetlenosť oka	[lx]
$E_{pp}$	osvetlenosť v bode P roviny $\rho$	[lx]
$E_{zd}$	osvetlenosť v mieste oka pozorovateľa	[lx]
$f_{TI}$	prahový prírastok	[%]
$G$	činiteľ oslnenia	[-]
$h$	vzdialenosť medzi pozorovaným obdĺžnikom a počiatkom sústavy	[m]
$H$	montážna výška uvažovaného svietidla	[m]
$I$	svietivosť svietidla v smere k pozorovateľovi	[cd]
$I_0$	vzťažná svietivosť	[cd]
$I_{80}$	svietivosť svietidla vo vertikálnej rovine rovnobežnej s osou komunikácie pod uhlom 80° od zvislice	[cd]

Symbol	Význam	Jednotka
$I_{88}$	svietivosť svietidla vo vertikálnej rovine rovnobežnej s osou komunikácie pod uhlom $88^\circ$ od zvislice	[cd]
$I_\gamma$	svietivosť bodového zdroja v smere lúča $l$	[cd]
$I_{\gamma\zeta}$	svietivosť v smere určenom uhlami $\gamma$ a $\zeta$	[cd]
$K(\lambda)$	svetelný účinok monochromatického žiarenia	[lm·W <sup>-1</sup> ]
$K_m$	maximálna hodnota spektrálneho priebehu $K(\lambda)$	[lm·W <sup>-1</sup> ]
$k_v$	konštanta závislá na veku pozorovateľa	[-]
$l$	vzdialenosť bodového zdroja a osvetľovanej plochy	[m]
$L$	jas svietidla	[cd·m <sup>-2</sup> ]
$L_p$	jas pozadia (adaptačný jas)	[cd·m <sup>-2</sup> ]
$L_v$	výsledný ekvivalentný závojevý jas	[cd·m <sup>-2</sup> ]
$L_{vk}$	ekvivalentný závojevý jas svietidla	[cd·m <sup>-2</sup> ]
$L_{voz}$	priemerná jas komunikácie	[cd·m <sup>-2</sup> ]
$L_{OP}$	jas zväzku lúčov v smere osi OP	[cd·m <sup>-2</sup> ]
$p$	počet jednodrojevých svetelných miest na 1km úseku komunikácie	[-]
$P$	činiteľ charakterizujúci vplyv polohy	[-]
$r$	polomer gule	[m]
$S$	veľkosť priemetu svietiacej plochy svietidla	[m <sup>2</sup> ]
$SLI$	parameter kontroly	[-]
$UGR$	jednotný systém hodnotenia oslnenia	[-]
$V$	vek pozorovateľa	[rok]
$V(\lambda)$	pomerná svetelná účinnosť monochromatického žiarenia	[-]
$x_d$	vzdialenosť medzi dvoma meracími bodmi	[m]
$Z$	bodový zdroj	[-]

## ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 2.1: Vymedzenie priestorového uhla na guľovej ploche [1].	16
Obr. 2.2: Výpočet priestorového uhla, pod ktorým je vidieť obdĺžnik BCDG [1].	16
Obr. 2.3: Sústava fotometrických rovín C- $\gamma$ [1].	17
Obr. 2.4: Osvetlenosť bodovým zdrojom Z v kontrolnom bode P ľubovoľnej roviny $\rho$ [1].	18
Obr. 2.5: Vymedzenie zväzku zbíhajúcich a rozbiehajúcich lúčov [1].	19
Obr. 2.6: Určenie ekvivalentného závojového jasu [1].	21
Obr. 3.1: Receptívne pole dvoch gangliových buniek [3].	24
Obr. 3.2: Okrajová detekcia rovnomerného svetelného zdroja spracovaním receptívnych polí gangliových buniek [4].	26
Obr. 4.1: Znázornenie priameho oslnenia a oslnenia odrazom [6].	28
Obr. 4.2: Závojové oslnenie vyvolané svetlometmi vozidla počas hmly [8].	29
Obr. 4.3: Vymedzenie uhlu $\theta$ [1].	32
Obr. 4.4: Svetelné zdroje umiestnené pred oblasťou kalkulácie [11].	34
Obr. 4.5: Distribúcia závojového jasu a priemerné jasy detegovaných zdrojov oslnenia [10].	35
Obr. 4.6: Distribúcia prahového prírastku $f_{II}$ [10].	36
Obr. 5.1: Poloha výpočtových bodov v jazdnom pruhu [11].	38
Obr. 6.1: Výsledná HDR fotografia z miesta 11 fotená objektívom 135 mm.	42
Obr. 6.2: Výsledná HDR fotografia z miesta 11 fotená objektívom 50 mm (landscape).	45
Obr. 6.3: Výsledná HDR fotografia z miesta 11 fotená objektívom 50 mm (portrait).	47
Obr. 6.4: Výsledná HDR fotografia z miesta 11 fotená objektívom 4,5 mm (Fish Eye).	50
Obr. 6.5: Detail centrálnej oblasti výslednej HDR fotografie z objektívu 4,5 mm (Fish Eye).	51
Obr. 6.6: Miesto s prekročenou hodnotou prahového prírastku.	53
Obr. 6.7: Ukážka zo simulácie v programe Relux.	55
Obr. 6.8: Meracie pole v programe Relux.	56
Obr. 6.9: Výsledná správa zo simulácie.	56

## **ZOZNAM TABULIEK**

Tab. 4.1: De Boerova stupnica hodnôt činiteľa G [1].	30
Tab. 6.1: Zvolené nastavenia clony (aperture), expozičných časov (shutter) a čísla ISO pri meraní objektívom 135 mm	42
Tab. 6.2: Namerané hodnoty z miesta 11 pre objektív 135 mm.	43
Tab. 6.3: Vypočítané hodnoty závojového jasu a prahového prírastku z miesta 11 pre objektív 135 mm.	43
Tab. 6.4: Zvolené nastavenia clony (aperture), expozičných časov (shutter) a čísla ISO pri meraní objektívom 50 mm (landscape).	45
Tab. 6.5: Namerané hodnoty z miesta 11 pre objektív 50 mm (landscape).	46
Tab. 6.6: Vypočítané hodnoty závojového jasu a prahového prírastku z miesta 11 pre objektív 50 mm (landscape).	46
Tab. 6.7: Namerané hodnoty z miesta 11 pre objektív 50 mm (portrait).	48
Tab. 6.8: Vypočítané hodnoty závojového jasu a prahového prírastku z miesta 11 pre objektív 50 mm (portrait).	48
Tab. 6.9: Zvolené nastavenia clony (aperture), expozičných časov (shutter) a čísla ISO pri meraní objektívom 4,5 mm (Fish Eye).	49
Tab. 6.10: Namerané hodnoty z miesta 11 pre objektív 4,5 mm (Fish Eye).	51
Tab. 6.11: Vypočítané hodnoty závojového jasu a prahového prírastku z miesta 11 pre objektív 4,5 mm (Fish Eye).	52
Tab. 6.12: Priemerné odchýlky prahového prírastku od hodnôt získaných z referenčného objektívu.	54

## **ZOZNAM PRÍLOH**

Príloha 1: Tabuľka výsledných hodnôt z merania na ulici Technická	62
Príloha 2: Tabuľka vypočítaných odchýlok hodnoty prahového prírastku	64
Príloha 3: Graf závislosti prahového prírastku na polohe 23 ročného pozorovateľa	65
Príloha 4: Graf závislosti prahového prírastku na polohe 60 ročného pozorovateľa	66
Príloha 5: Graf závislosti prahového prírastku na polohe 70 ročného pozorovateľa	67
Príloha 6: Lokalita meraného úseku ulice Technická	68
Príloha 7: Vyznačenie meraného úseku a smeru merania	68

# 1. ÚVOD

Táto práca je zameraná na hodnotenie oslnenia exteriérových osvetľovacích sústav. Hodnotenie tohto oslnenia je veľmi dôležité pre dodržanie zrakového výkonu a zrakovej pohody osoby nachádzajúcej sa v exteriéry s umelou osvetľovacou sústavou. Oslnenie je faktorom, na ktorý nie je v niektorých prípadoch pri návrhu osvetľovacích sústav prihliadané, čo môže v lepších prípadoch viesť k určitej nepohode a pri najhorších situáciách až k závažným nehodám. Ľudské oko je zložitý orgán zraku, ktorým vnímane dopadajúce svetlo a kde prebieha jeho prvotné spracovanie. Ľudia vnímajú väčšinu informácií okolo seba zrakom a preto je veľmi dôležité vyvarovať sa možnému oslneniu či už od verejného osvetlenia alebo rôznych pútačov či billboardov.

Prvá kapitola tejto práce bude venovaná popisu základných svetelno-technických veličín, ktoré budú využívané v ďalších častiach práce. Všetky tieto informácie budú získané z odbornej literatúry.

Ďalej bude popísané vnímanie svetla, dopadajúceho zo svetelného zdroja, ľudským okom. Táto časť bude bližšie zameraná na popis gangliových buniek, konkrétnejšie spôsobu vnímania svetla receptívnymi poľami. K tomuto bude použitá odborná literatúra z oblasti očné lekárstva a svetelnej techniky.

Posledná kapitola rešeršnej časti bude venovaná oslneniu, najprv definícii a rozdeleniu, a neskôr spôsobom výpočtu oslnenia, konkrétne výpočet prahového prírastku na komunikáciách. Táto časť bude spracovávaná podľa normy ČSN EN 13201. Na záver kapitoly bude popísané experimentálne meranie prahového prírastku exteriérových sústav vykonané T.Porschom a jeho tímom, ktoré je inšpiráciou pre praktickú časť.

Praktická časť práce bude začínať krátkym popisom meracieho aparátu a postupu určenia meracieho poľa pre zistenie prahového prírastku na komunikácii. Následne bude na základe teoretických poznatkov vykonané experimentálne meranie vybraného úseku komunikácie. Meranie bude vykonané 4 spôsobmi, 3 rôznymi objektívmi pričom jeden z nich bude zvolený ako referenčný. V záverečných pasážach tejto práce budú vyhodnocované výsledky z merania a bude spravené porovnanie jednotlivých objektívov s referenčným. Cieľom bude zistiť, či je možné využiť na meranie oslnenia aj iný objektív ako je referenčný 135 mm. V poslednej časti bude prevedená simulácia meraného úseku a následné porovnanie s nameranými hodnotami.

## 2. SVETELNOTECHNICKÉ VELIČINY

Táto kapitola je venovaná popisu svetelno-technických veličín, ktoré budú v tejto práci použité. Ide o krátku sumarizáciu a popis jednotlivých veličín vrátane vzťahov na ich vyjadrenie.

### 2.1 Svetelný tok

Táto veličina je podľa [1] definovaná ako svetelno-technická veličina, ktorá odpovedá žiarivému toku a vyjadruje schopnosť žiarivého toku spôsobiť zrakový vnem. Jednotkou svetelného toku je lumen (lm). Svetelný tok  $\Phi$  monochromatického žiarenia vlnovej dĺžky  $\lambda$ , ktorého žiarivý tok je  $\Phi_e$  sa určí zo vzťahu (2.1).

$$\Phi(\lambda) = K(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) \quad (\text{lm}; \text{lm} \cdot W^{-1}, -, W) \quad (2.1)$$

Veličina  $K(\lambda)$  je svetelný účinok monochromatického žiarenia rovný pomeru svetelného toku a jemu odpovedajúceho žiarivého toku. Väčšinou je táto hodnota vyjadrená ako súčin maximálnej hodnoty  $K_m$  spektrálneho priebehu veličiny  $K(\lambda)$  a pomernej svetelnej účinnosti  $V(\lambda)$  monochromatického žiarenia, vid' vzťah (2.2).

$$K(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda) \quad (\text{lm} \cdot W^{-1}; \text{lm} \cdot W^{-1}, -) \quad (2.2)$$

Z hľadiska individuálneho pozorovateľa je veličina  $V(\lambda)$  totožná s pomernou spektrálnou citlivosťou pozorovateľa (zvyčajne normálneho fotometrického pozorovateľa pri fotopickom videní).

Svetelný tok  $\Phi$  žiarenia zloženého z rôznych monochromatických žiarení, ktorého žiarivý tok  $\Phi_e$  je daný priebehom  $\Phi_{e(\lambda)}$  sa zistí zo vzťahu (2.3).

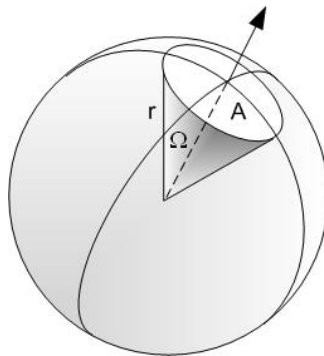
$$\Phi = 683 \cdot \int_0^\infty \left( \frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \right)_\lambda \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (\text{lm}; \text{lm} \cdot W^{-1}, W \cdot m^{-2}, m) \quad (2.3)$$

### 2.2 Priestorový uhol

Veľmi dôležitou geometrickou veličinou používanou v svetelnej technike je podľa [1] práve priestorový uhol. Jeho veľkosť je určená veľkosťou plochy vyťatej všeobecnou kužeľovou plochou na povrchu jednotkovej gule, ktorej stred (vrchol priestorového uhla) je totožný s vrcholom uvažovanej kužeľovej plochy. Jednotkou priestorového uhlu je steradián (sr), určený jednotkovou plochou ( $1 \text{ m}^2$ ) na povrchu jednotkovej gule (s polomerom 1 m). Priestorový uhol  $\Omega$ , pod ktorým je zo stredu gule o polomere  $r$  vidieť plocha  $A$  vyťatá na povrchu tejto gule sa stanoví zo vzťahu (2.4).

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (sr; m^2, m) \quad (2.4)$$

Najväčšia hodnota akú môže priestorový uhol dosiahnuť je  $\Omega_{\max} = 4\pi$  pre plochu rovnú povrchu celej gule, teda  $A = 4\pi r^2$ .

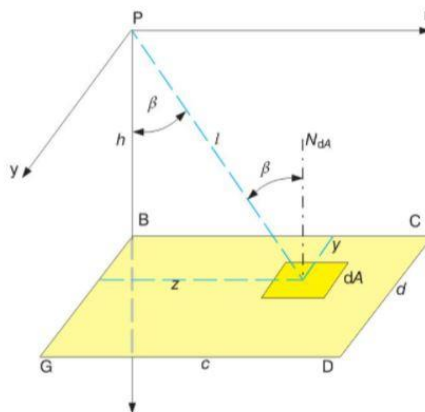


Obr. 2.1: Vymedzenie priestorového uhla na guľovej ploche [1].

V praxi je ale častejšie počítaný priestorový uhol, pod ktorým sa z určitej vzdialenosti pozoruje obdĺžniková plocha. Pozorovaný obdĺžnik BCDG (obr. 2.2) leží v sústave súradníc x, y, z v rovine rovnobežnej s rovinou xy vo vzdialenosti  $h$  od počiatku sústavy  $P$ . Priestorový uhol, pod ktorým je z bodu  $P$  vidieť obdĺžnik BCDG (kolmý priemet bodu  $P$  do roviny obdĺžnika BCDG sa stotožňuje s vrcholom V), sa určí zo vzťahu (2.5).

$$\Omega = \arctg \frac{c \cdot d}{h \cdot \sqrt{c^2 + d^2 + h^2}} = \arctg \frac{a \cdot b}{\sqrt{1 + a^2 + b^2}} (sr; m, m, m; -, -) \quad (2.5)$$

Kde platí  $a = \frac{c}{h}$  ;  $b = \frac{d}{h}$  .



Obr. 2.2: Výpočet priestorového uhla, pod ktorým je vidieť obdĺžnik BCDG [1].

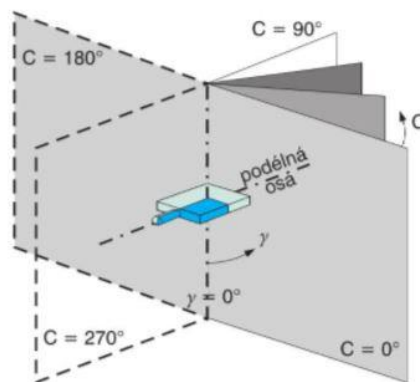


## 2.3 Svietivosť

Pri nerovnomernom rozložení svetelného toku zdroja či svietidla do rôznych smerov priestoru je potrebné okrem hodnoty úhrnného svetelného toku, podľa [1], poznať aj priestorovú hustotu svetelného toku v rôznych smeroch, teda svietivosť zdroja, poprípade svietidla v týchto smeroch. Jednotkou svietivosti je kandela (cd), ktorá patrí medzi základné jednotky sústavy SI. Svietivosť  $I_{\gamma\zeta}$  svietidla v smere určenom uhlami  $\gamma, \zeta$  je ako priestorová hustota vyžarovaného svetelného toku rovná svetelnému toku obsiahnutému v jednotkovom priestorovom uhle a určí sa vzťahom (2.6).

$$I_{\gamma\zeta} = \frac{d\Phi}{d\Omega_{\gamma\zeta}} \quad (\text{cd}; \text{lm}, \text{sr}) \quad (2.6)$$

Kde  $d\Omega_{\gamma\zeta}$  je priestorový uhol, ktorého os leží v smere určenom uhlami  $\gamma, \zeta$ , a v ktorého medziach uvažovaný zdroj či svietidlo vyžaruje tok  $d\Phi$ . Po zistení hodnôt svietivosti svietidla vo všetkých smeroch priestoru a spojení vzniknutých rádiusvektorov vznikne fotometrická plocha svietivosti. Pri výpočte zvyčajne stačí poznať len niektoré rezy touto plochou, a to rovinami prechádzajúcimi bodovým zdrojom. V rovinách rezu tak vzniknú krivky svietivosti v polárnych súradniciach. Krivky svietivosti sa zvyčajne udávajú v určitých rovinách vybraných z niektorého z troch typov zväzkov rovnobežných rovín, ktorých priesečnica prechádza svetelným stredom svietidla. Medzinárodná komisia pre osvetľovanie odporúča použitie sústavy fotometrických rovín C- $\gamma$  (obr. 2.3) a B- $\beta$ .



Obr. 2.3: Sústava fotometrických rovín C- $\gamma$  [1].

## 2.4 Osvetlenosť

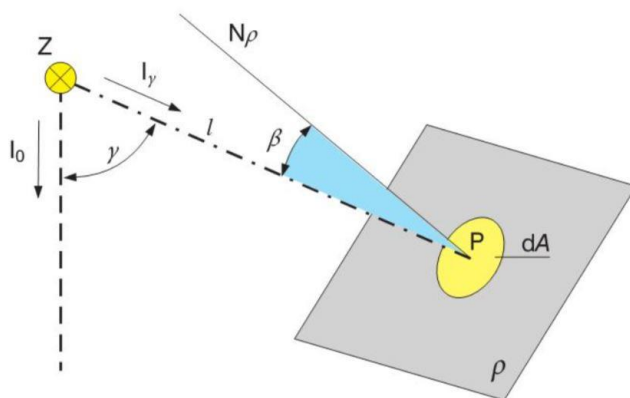
Intenzita osvetlenia alebo osvetlenosť  $E$  rovinnej plochy  $dA$ , teda plošná hustota svetelného toku  $d\Phi_d$  dopadnutého na plochu  $dA$  je podľa [1] určená vzťahom (2.7).

$$E = \frac{d\Phi_d}{dA} \quad (lx; lm, m^2) \quad (2.7)$$

Ak sa bodovým zdrojom  $Z$  osvetľuje zo vzdialenosti  $l$  plocha  $dA$  tvoriaca okolie bodu  $P$  v rovine  $\rho$  a normála  $N\rho$  roviny  $\rho$  zvierá uhol  $\beta$  s lúčom  $l$ , môžeme s využitím vzťahu (2.7) odvodiť vzťah (2.8) pre osvetlenosť  $E_{P\rho}$  v bode  $P$  roviny  $\rho$  bodovým zdrojom.

$$E_{P\rho} = \frac{I_\gamma}{l^2} \cos \beta \quad (lx; cd, m, -) \quad (2.8)$$

Kde je  $I_\gamma$  svietivosť bodového zdroja v smere lúča  $l$ , teda v smere pod uhlom  $\gamma$  od zvoleného smeru vzťažnej svietivosti  $I_0$ .



Obr. 2.4: Osvetlenosť bodovým zdrojom  $Z$  v kontrolnom bode  $P$  ľubovoľnej roviny  $\rho$  [1].

## 2.5 Jas zväzku svetelných lúčov

Jedná sa o svetelno-technickú veličinu, na ktorú podľa [1] bezprostredne reaguje zrakový orgán. Jedná sa o veličinu všeobecne určenú priestorovou a plošnou hustotou svetelného toku prenášaného lúčmi vyjadrenú vzťahom (2.9).

$$L_{OP} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA_n} \quad (cd \cdot m^{-2}; lm, sr, m^2) \quad (2.9)$$

Kde je  $L_{OP}$  jas zväzku lúčov v smere osi  $OP$  zväzku,  $d\Omega$  je priestorový uhol a  $dA_n$  je plocha kolmá k ose zväzku lúčov, na ktorých sa realizuje plošná hustota svetelného toku.

Ak vymedzíme zväzok lúčov dvoma otvormi o veľkosti plochy  $dA_1$  a  $dA_2$  v ľubovoľne umiestnených tienidlách  $A_1$  a  $A_2$  (obr. 2.5) a ak sú rozmery otvorov  $dA_1$  a  $dA_2$  zanedbateľné v porovnaní s vzdialenosťou  $l$  medzi tienidlami  $A_1$  a  $A_2$ , vyplývajú z toho nasledujúce vzťahy (2.10) a (2.11).

- a) Pre jas  $L_{OP}$  zväzku lúčov *zbiehajúcich* sa v priestorovom uhle  $d\Omega_1 = dA_1 \cos \gamma l^{-2}$  z plochy  $dA_1$  do bodu P

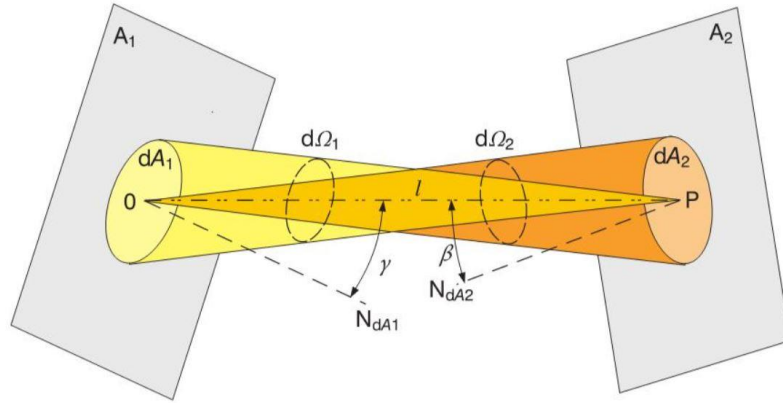
$$L_{OP} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega_1 dA_2 \cos \beta} = \frac{dE_N}{d\Omega_1} \quad (cd \cdot m^{-2}; lm, sr, m^2; lx, sr) \quad (2.10)$$

Kde  $dE_N$  značí normálovú osvetlenosť, teda osvetlenosť priemetu plochy  $dA_2$  do roviny kolmej k lúču  $l$ . Tento vzťah sa používa k určeniu jasu zdroja v smere oka pozorovateľa alebo fotónky.

- b) Pre jas  $L_{OP}=L_\gamma$  zväzku lúčov *rozbiehajúcich* sa v priestorovom uhle  $d\Omega_2 = dA_2 \cos \beta l^{-2}$  z bodu O

$$L_{OP} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega_2 dA_1 \cos \gamma} = \frac{dI_\gamma}{dA_1 \cos \gamma} \quad (cd \cdot m^{-2}; lm, m^2, sr; cd, m^2) \quad (2.11)$$

Kde je  $dI_\gamma = d\Phi/d\Omega_2$  svietivosť plochy  $dA_1$  v smere pod uhlom  $\gamma$  od normály  $N_{dA1}$ .



Obr. 2.5: Vymedzenie zväzku zbiehavých a rozbiehavých lúčov [1].

### 2.5.1 Jas pozadia

Jas pozadia  $L_p$  je podľa [2] definovaný ako rovnomerný jas celého okolia, ktorý vytvára rovnakú osvetlenosť na zvislej rovine prechádzajúcej okom pozorovateľa, ako zorné pole bez oslňujúcich zdrojov. Vypočíta sa podľa vzťahu (2.12).

$$L_p = \frac{E_i}{\pi} \quad (cd \cdot m^{-2}; lx, -) \quad (2.12)$$

Kde  $E_i$  je nepriama osvetlenosť oka pozorovateľa.

Jas pozadia  $L_p$  sa zvyčajne vypočíta z  $E_i$ , ktorá môže byť stanovená buď výpočtom na počítači z rozloženia svietivosti v priestore, alebo výpočtom pomocou nepriameho činiteľa využitia stien. Tento výpočet je založený na predpoklade, že priemerná nepriama osvetlenosť stien sa viac-menej rovná nepriamej osvetlenosti oka pozorovateľa. Tento predpoklad dobre vychádza u sústav celkového osvetlenia so svietidlami s pravidelným usporiadaním.

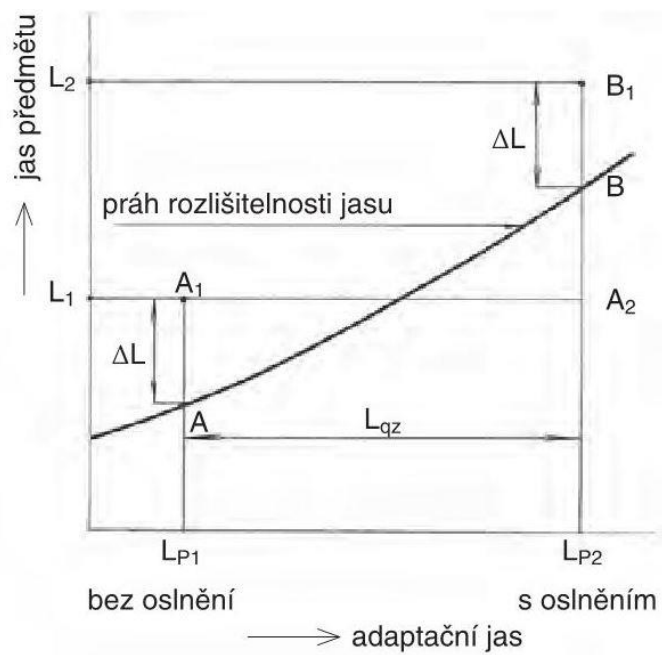
Iný prístup sa volí pri výpočte jasov povrchov miestnosti. Nepriama osvetlenosť oka pozorovateľa sa stanoví výpočtom osvetlenosti spôsobenej odrazeným svetlom od stien. Tento prístup je vhodnejší než predchádzajúci, avšak stále vychádza z predpokladu, že povrchy miestnosti sú osvetlené rovnomerne.

Pri najvšeobecnejšej metóde sú povrchy miestnosti rozdelené na čiastkové povrchy. Jas každého čiastkového povrchu je určený vzájomnými odrazmi medzi nimi a priamou osvetlenosťou od svietidiel. Nakoniec sa stanoví osvetlenosť oka pozorovateľa vytvorená čiastkovými povrchmi.

Hodnota  $UGR$  je pomerne necitlivá k chybám  $L_p$ ; napríklad chyba v rozsahu +33 %  $L_p$  spôsobí chybu  $UGR$  rovnajúcu sa 1 jednotke.

### 2.5.2 Ekvivalentný závojový jas

Pri hodnotení fyziologického oslnenia sa podľa [1] vychádza z úvahy, že oslnenie vyvoláva vo vnútri oka určitý rozptyl svetla, ktorého vplyv je možno postihnúť hodnotou ekvivalentného závojového jasu. To je jas, o ktorý je treba zvýšiť pôvodný adaptačný jas, aby sa za stavu bez fyziologického oslnenia dosiahlo prahu rozlíšiteľnosti jasu zisteného pri oslnení. Vychádza sa z predpokladu. Že závislosť prahu rozlíšiteľnosti jasu predmetu na adaptačnom jase je približne lineárna ako ukazuje obr. 2.6. Ak je pri adaptačnom jase  $L_{p1}$  k spoľahlivému rozlíšeniu určitého predmetu (bod  $A_1$ ) potrebný rozdiel  $\Delta L$  jasu predmetu  $L_1$  a prahu rozlíšiteľnosti jasu v bode A, potom pri oslnení možno vplyv rozptylu svetla vo vnútri oka interpretovať tak, ako by oslnená časť sietnice bola adaptovaná na vyšší jas  $L_{p2}$ . Predmet, ktorého jas je  $L_1$ , je pri adaptačnom jase  $L_{p2}$  už nerozlíšiteľný, pretože bod  $A_2$  leží pod prahom B rozlíšiteľnosti jasu. Pôvodná rozlíšiteľnosť sa dosiahne zvýšením jasu predmetu (bod  $B_1$ ) na hodnotu  $L_2$ , aby bol opäť zachovaný rozdiel jasov  $\Delta L$  od prahu rozlíšiteľnosti, tj. od bodu B. Rozdiel adaptačných jasov ( $L_{p2} - L_{p1}$ ) sa pokladá za mierku pôsobenia rozptylu svetla (vzniku závoja) v očných médiách a je teda rovný ekvivalentnému závojovému jasu  $L_{qz} = L_{p2} - L_{p1}$ .



Obr. 2.6: Určenie ekvivalentného závojové jasú [1].

### **3. OKO A VNÍMANIE SVETLA**

Videnie je podľa [1] proces prebiehajúci v zrakovom ústroji a zahrňujúci jak príjem informácie prenášanej do oka svetelným podnetom, tak jej spracovanie a transformáciu optických podnetov na nervové vzruchy, ktoré sa zrakovým nervom vedú k mozgovým centrom videnia, kde vzniká zrakový pocit. Syntézou pocitov sa potom vo vedomí človeka vytvára vnem umožňujúci poznanie, identifikáciu pozorovaného predmetu a jeho určité zatriedenie vo vedomí, a to buď k bezprostrednému využitiu pri určitej činnosti alebo k uchovaniu v pamäti k neskoršej aplikácii. Zrak je teda pre človeka vlastne zariadenie pre príjem a spracovanie informácie o vonkajšom prostredí. Nositeľom tejto informácie je svetlo, svetelný podnet. Svetlo a osvetlenie sa takto javia ako prostriedky umožňujúce prijatie spomenutej informácie a pochopiteľne môžu príjem informácie buď uľahčiť ale sťažiť.

Sietnica, je časť nervovej sústavy oka, kde dochádza k prvému spracovaniu zrakovej informácie, teda jej príjem, zakódovanie do podoby schopnej prenosu do vyšších úrovní zrakového systému, ale taktiež aj určitý výber užitočnej informácie. Na zrakovnej nervovej dráhe sa rozlišujú štyri úrovne špecializovaných nervových buniek (neurónov), schopných prijímať a odvádzať určité podráždenia či signály. K zrakovým neurónom patria :

- I. bunky citlivé na svetlo (fotoreceptory)
  - a. čapíky
  - b. tyčinky
  - c. čidlá cirkadiálnej sústavy
- II. bipolárne bunky
- III. gangliové bunky
- IV. telá nervových buniek vysielajúce svoje neurity z podkorových jadier mozgu do mozgovej kôry

#### **3.1 Fenomén sumácie**

Ako uvádza [3] v sietnici jedného oka sa nachádza priemerne 120 miliónov tyčiniek a 6 miliónov čapíkov. Oproti tomu slepá škvrna obsahuje 1 milión axónov, pričom platí všeobecné pravidlo, že jeden neurit vychádza z jednej gangliovej bunky. Z uvedených čísel vyplýva, že v sietnici dochádza k výraznej konvergencii vertikálnych spojov medzi fotoreceptormi, bipolárnymi a gangliovými bunkami. Plochu sietnice, z ktorej sa elektrické signály generované fotoreceptormi zbiehajú vo vertikálnom smere ku gangliovej bunke sa nazýva receptívne pole. Stupeň konvergence a z neho vyplývajúce receptívne pole nie sú vo všetkých miestach sietnice rovnaké. Vo feovey sú neuróny prepojené bez konvergence. Toto prepojenie je príčinou malej citlivosti k intenzite dopadajúceho svetla. Nekonvergentné prepojenie ďalej spôsobuje, že receptívne pole má veľmi malú veľkosť. V dôsledku toho má obrazová informácia nepatrnú „zrnitosť“ a

môže byť preto vnímaná s maximálnou zrakovou ostrosťou. Smerom do periférie sietnice väčší počet fotoreceptorov konverguje svoju aktivitu vo vertikálnom smere prostredníctvom bipolárnych buniek na jednu gangliovú bunku. Vysoký stupeň konvergenzie vytvára predpoklad pre uplatnenie fenoménu sumácie na synaptických spojoch s gangliovými bunkami. Periféria sietnice sa preto vyznačuje vyššou citlivosťou k intenzite dopadajúceho svetla. Vysoká konvergenzia však na druhej strane spôsobuje, že receptívne pole v týchto miestach má relatívne veľkú plochu. V dôsledku toho obrazová informácia prichádzajúca z periférie sietnice do vyšších etáží centrálného nervového systému má vysokú „zrornosť“ a je vnímaná s malou zrakovou ostrosťou.

### **3.2 Aktivita horizontálnych, bipolárnych a amakrinných buniek**

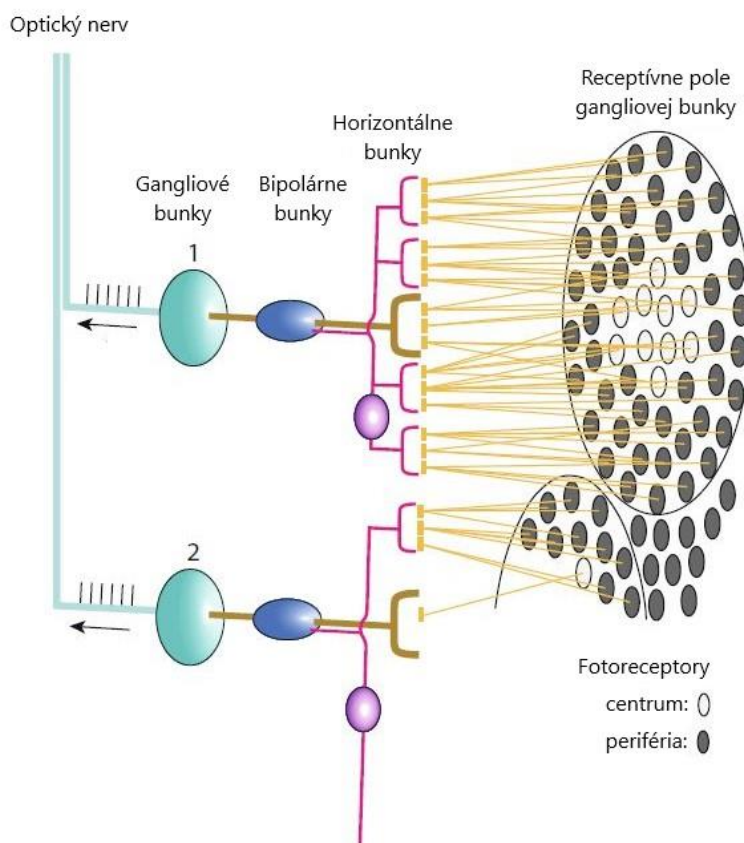
Receptorové potenciály sú podľa [3] spracovávané vo vrstve bipolárnych buniek. Spojenie bipolárnych buniek sa uskutočňuje prostredníctvom jednak priamo a cez horizontálne bunky v tzv. triádach (spojenie fotoreceptoru, horizontálnej a bipolárnej bunky). Činnosťou horizontálnych buniek vznikajú S-potenciály. Sú to negatívne potenciály s amplitúdou 10-50 mV. Horizontálne bunky, podobne ako fotoreceptory, sú v tme depolarizované a na osvetlenie reagujú hyperpolarizáciou. Existujú dva typy horizontálnych buniek, tzv. L-typ, ktorý reaguje hyperpolarizáciou na všetky farby spektra rovnomerne a jeho odpoveď sa zvyšuje úmerne s intenzitou osvetlenia. Druhý typ, tzv. C-typ, ktorý má značný význam pre farebné videnie reaguje špecificky na určité zložky spektra. Jedna skupina C-typu je maximálne depolarizovaná červenou zložkou spektra a maximálne hyperpolarizovaná zelenou zložkou spektra. Druhá skupina buniek C-typu má maximum depolarizácie pri žltej zložke a maximum hyperpolarizácie pri modrej zložke. Z toho vyplýva, že informácia o farbe svetla sa prenáša z troch typov čapíkov na dva typy horizontálnych buniek.

Prvé bunky, ktoré sú schopné generovať akčné potenciály, sú amakrinné bunky. Ich úloha pravdepodobne spočíva v signalizácii úrovne osvetlenia sietnice, na ktoré reagujú depolarizáciou a výbojmi akčných potenciálov. K ďalšiemu spracovaniu informácie sú určené gangliové bunky. Slúžia k spracovaniu informácie o veľkosti a intenzite svetelného podnetu a ktoré vo forme akčných potenciálov vysielajú do vyšších zrakových centier.

### **3.3 Funkcia gangliových buniek**

V sietnici môžeme rozlíšiť podľa [3] dva typy gangliových buniek: veľké (zvané Y), ktoré sčítavajú odpovede z rôznych typov čapíkov a podieľajú sa na rozlíšení pohybu a priestorového videnia a malé (zvané X), ktoré odčítajú rozdielne vstupné informácie z rôznych typov čapíkov a podieľajú sa na rozlíšení farieb. Z tohoto dôvodu sa tieto

informačné kanály niekedy označujú ako X a Y cesta. Neuróny X tvoria 80% a neuróny Y tvoria 10% všetkých gangliových buniek. V sietnici existuje ešte tretia skupina gangliových buniek označovaných ako W. Tvoria 10 % gangliových buniek. Väčšina z nich vysiela svoje axóny do stredného mozgu a predpokladá sa, že majú vzťah k reflexným pohybom očí a hlavy za objektom vo vizuálnom priestore. Obr. 3.1 ukazuje receptívne pole dvoch gangliových buniek. Z obrázku sa môže zdať, že receptívne polia sú veľké oblasti, ale sú veľmi malé, keďže sietnica sa skladá z viac než 100 miliónov fotoreceptorov a 1 milióna gangliových buniek.



Obr. 3.1: Receptívne pole dvoch gangliových buniek [3].

### 3.4 Mechanizmus vnímania

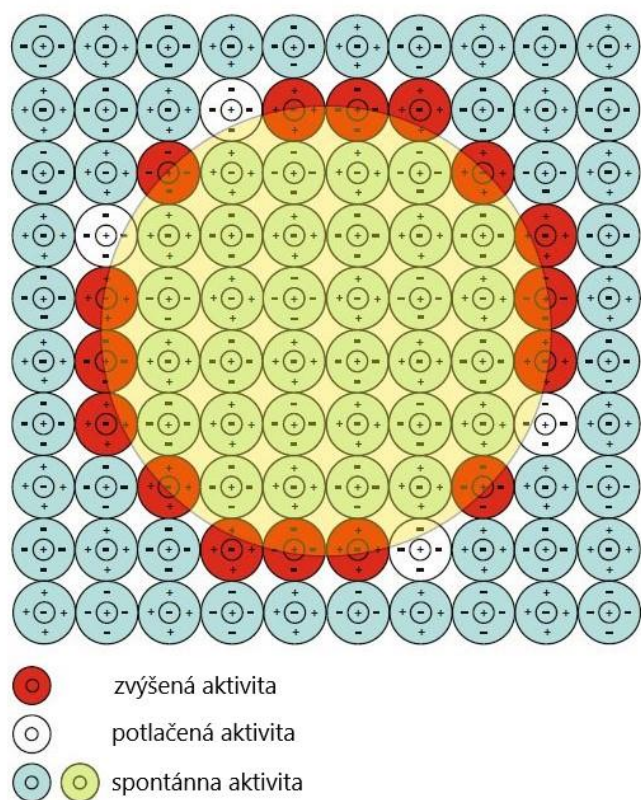
Základný spôsob, ktorým je tvar objektu kódovaný, spočíva podľa [2] v rozdielnom dráždení fotoreceptorov kontrastnými líniami obrázku premietaného na sietnici. Prvým detektor vlastností, ktorý umožňuje detekciu kontrastu sú gangliové bunky sietnice. Tieto bunky porovnávajú signály prichádzajúce z centrálnej oblasti receptívneho poľa so signálmi prichádzajúcimi z periférnej oblasti. Príslušný detail vizuálneho podnetu, ktoré bunky detegujú, je možné skúmať štúdiom ich receptívnych polí. Receptívne pole je oblasť sietnice, ktorej svetelným podráždením môžeme vyvolať vzrast alebo útlm



elektrickej aktivity pozorovaného neurónu. Receptívne pole gangliových buniek nie je homogénne, ale má svoju charakteristickú vnútornú štruktúru, podľa ktorej rozlišujeme dva typy týchto neurónov. Bunky s *on-centrom* a s *off-centrom*. Receptívne pole týchto gangliových buniek sa skladá z koncentricky usporiadanej centrálnej a periférnej zóny. Gangliové bunky s *on-centrom* reagujú na osvetlenie stredu receptívneho poľa vzrastom svojej tonickej aktivity, osvetlenie periférie svetelnou škvrnou alebo prstencom spôsobí naopak inhibíciu elektrickej aktivity. Bunky s *off-centrom* reagujú opačne, osvetlenie centra vedie k útlmu a osvetlenie periférie k vzrastu frekvencie generovaných akčných potenciálov. Osvietenie jak centra, tak periférie difúznym svetlom nespôsobí u oboch typov neurónov výraznú zmenu ich tonickej aktivity vďaka antagonistickému pôsobeniu oboch zón receptívneho poľa.

Obr. 3.2 ukazuje ako podľa [4] vplýva svetelný zdroj rovnomerného osvetlenia na skupinu receptívnych polí susedných gangliových buniek. Na obrázku je možno vidieť, že svetelný zdroj pokrýva celú centrálnu časť gangliových buniek. Výsledná aktivita týchto centrálnych buniek je potlačená na spontánnu aktivitu. Veľa gangliových buniek, ktoré sa prekrývajú s okrajom svetelného zdroja, čiastočne prekrýva centrálnu a periférnu časť. Výsledná aktivita týchto okrajových častí je vyššia, než je u čisto centrálnych. Spracovaním týchto informácií z receptívnych polí je detegovaný okraj svetelného zdroja. Iba táto informácia je posúvaná ďalej do zrakovej kôry. Keďže sietnica obsahuje viac než milión gangliových buniek, je okraj svetelného zdroja prekrytý s oveľa väčším počtom gangliových buniek a s oveľa väčšou hustotou, než ukazuje obr. 3.2. Takže okraj svetelného zdroja je v skutočnosti ostrejšie zameraný gangliovými bunkami.

Pri rovnomernom osvetlení vychádzajúcom zo svetelného zdroja je menej informácií smerovaných gangliovými bunkami do mozgu, takže mozog je menej zapojený. Množstvo menších svetelných zdrojov (napr. matica z LED zdrojov) excituje oveľa viac gangliových buniek v dôsledku väčšieho počtu okrajov a následne viac zapojí mozog do spracovania.



Obr. 3.2: Okrajová detekcia rovnomerného svetelného zdroja spracovaním receptívnych polí gangliových buniek [4].

## **4. OSLNENIE**

### **4.1 Definícia**

Podľa [1] je oslnenie definované nasledujúco:

Ak sa vyskytujú v zornom poli oka veľké jasy alebo ich rozdiely, poprípade vzniknú veľké priestorové či časové kontrasty jasov, ktoré výrazne prekračujú medze adaptability zraku, vzniká oslnenie. Pri ňom je sťažený až znemožnený prístup a príjem svetlom prenášaných informácií do oka, a tým je negatívne ovplyvnená činnosť zrakového ústrojenstva vo všetkých jeho kanáloch a na všetkých jeho úrovniach – a pochopiteľne je narušená aj zraková pohoda. Oslnenie je teda nepriaznivý stav zraku, ku ktorému dochádza ak je sietnica alebo jej časť vystavená vyššiemu jas, než na ktorý je oko adaptované.

Ako ukazuje [1], oslnenie možno rozdeliť na viacero druhov v závislosti na príčine:

- oslnenie priame
- oslnenie odrazom
- prechodové oslnenie
- závojové oslnenie
- oslnenie kontrastom

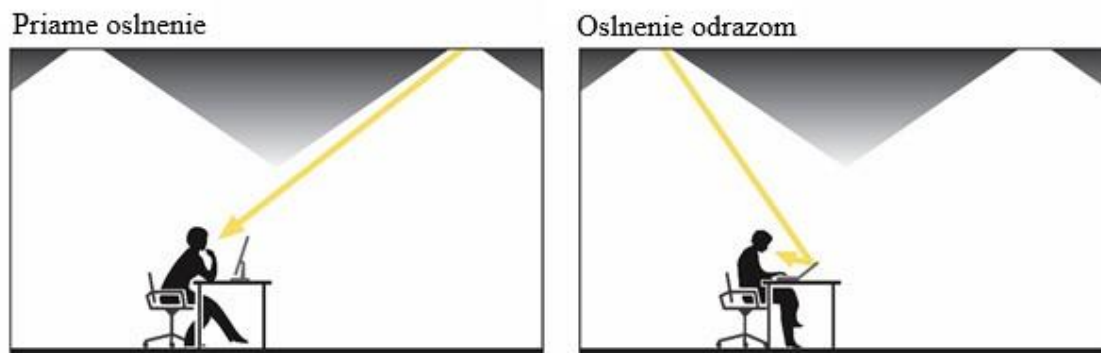
#### **4.1.1 Priame oslnenie**

Toto oslnenie je podľa [1] spôsobené nadmerným jasom svietiacich častí svietidiel alebo hlavných povrchov priestoru (napr. strop a steny pri nepriamom osvetlení). Podľa [5] sa priame oslnenie delí na priame centrálné a priame periférne. Ak hovoríme o priamom centrálnom oslnení, pozorovateľ hľadá priamo do zdroja oslnenia čo vplýva na centrálné videnie, kedy je najcitlivejšia časť sietnice, fovea (ústredná jamka sietnice), vystavená relatívne veľkému stimulu v porovnaní s tým, na čo je oko adaptované. V prípade priameho periférneho oslnenia je oko fixované na nejaký objekt (väčšinou vo vzdialenosti vhodnej na čítanie) a následne vplyvom lúča oslnenia zo svetelného zdroja, ktorý zvierajú uhol s osou videnia, dochádza k stimulovaniu periférnej oblasti sietnice.

#### **4.1.2 Oslnenie odrazom (nepriame)**

Ako hovorí [1] je spôsobené odrazmi svietiacich plôch na lesklých častiach pozorovaných predmetov a ich bezprostredného okolia. V dnešnej dobe sú najväčším nástrojom, ktorý dopomáha vzniku oslnenia odrazom, elektrické zariadenia. V kanceláriách sú to v prvom rade monitory a preto je potrebné správne navrhnuť osvetľovaciu sústavu aby sa zabránilo zbytočnému vzniku zrakovej nepohody. V dnešnej dobe zohrávajú veľkú úlohu pri

vzniku nepriameho oslnenia smartfóny a tablety. Preto je potrebné, aby si ľudia tieto súvislosti uvedomovali, keďže čo i len minimálne nepriame oslnenie môže viesť k zrakovej nepohode a to následne k ďalším, či už psychickým alebo fyzickým problémom. Na obr. 4.1 je možno vidieť rozdiel medzi nepriamym a priamym oslnením pri sedení za počítačom.



Obr. 4.1: Znázornenie priameho oslnenia a oslnenia odrazom [6].

### 4.1.3 Prechodové oslnenie

Ako uvádza [1] dochádza k nemu pri náhlej zmene adaptačného jasu, kedy sa zrkové ústrojenstvo nestačí dostatočne rýchlo prispôbiť (napr. pri náhlom prechode z tmavšieho prostredia do svetlejšieho).

Bencko [7] bližšie špecifikuje, že zrkovú pohodu narušujú náhle zmeny jasu už od pomeru 1:10. Bežne avšak pri hodnotách pomeru 1:100 a vyšším. Tento druh oslnenia zaniká akonáhle sa oko adaptuje na novú úroveň jasu.

### 4.1.4 Závojové oslnenie

Toto oslnenie je zvláštnym prípadom, ktoré vzniká, ak je pred pozorovaným pozadím prostredie s vyšším jasom (napr. pri pozorovaní cez osvetlenú záclonu, pri hmle pred svetlometmi, zrkadlenie v skle a pod.). Táto definícia je popísaná v [1] a obr. 4.2 ukazuje ako môže tento druh oslnenia vyzerieť.



Obr. 4.2: Závojské oslňenie vyvolané svetlometmi vozidla počas hmly [8].

### 4.1.5 Oslňenie kontrastom

Najdôležitejším typom oslňenia je podľa [1] z hľadiska svetelnej techniky oslňenie kontrastom (relatívne oslňenie). Je spôsobené tým, že sa v zornom poli vyskytnú jasy (napr. vplyvom primárnych či sekundárnych zdrojov) príliš veľké v porovnaní s jasom, na ktorý je zrak adaptovaný.

Rovnako ako pri prechodnom oslňení aj tu sú podľa [7] stanovené hodnoty pomeru jasov, kedy dochádza k oslňeniu, na 1:100 a vyššie s tým, že k oslňeniu môže prísť už pri pomere jasov 1:10.

Oslňenie kontrastom môžeme podľa psychofyzologických následkov deliť na:

1. oslňenie psychologické
  - a. pozorovateľné
  - b. rušivé
2. oslňenie fyziologické
  - a. obmedzujúce
  - b. oslepujúce

#### 4.1.5.1 Psychologické oslňenie

Pri tomto druhu oslňenia podľa [1] oslňujúci zdroj v zornom poli odpútava pozornosť pozorovateľa od vlastnej zrakovej úlohy. Výsledkom toho vzniká subjektívny pocit zrakovej nepohody a nadmerne rastie únava, bez toho aby si pozorovateľ uvedomoval, že je to zavinené oslňením.

#### De Boerova stupnica

Keďže je tento druh oslňenia veľmi subjektívny, tak neexistuje žiadny ucelený spôsob, ako by bolo možné toto oslňenie hodnotiť. V dôsledku tohto de Boer vypracoval svoju 9-bodovú stupnicu, ktorá sa stala najpoužívanejšou stupnicou v oblasti hodnotenia

rušivého oslnenia vo vnútornom či vonkajšom osvetlení. Táto stupnica je zobrazená v tab. 4.1. Pri experimente popísanom v [5] testované subjekty považovali túto stupnicu za príliš zložitú a preto bola pre potreby experimentu upravená z deviatich hodnôt na sedem. Toto dokazuje, že ani de Boerova stupnica nepredstavuje ucelený spôsob hodnotenia tohto oslnenia, ale naopak závisí na subjektoch a ich fyziológii.

Tab. 4.1: De Boerova stupnica hodnôt činiteľa  $G$  [1].

Činiteľ $G$	1	3	5	7	9
Subjektívny dojem o miere oslnenia	nezniesiteľné	rušivé	ešte prijateľné	potlačené	nepoznateľné

#### 4.1.5.2 Fyziologické oslnenie

Tento druh oslnenia by sa podľa [1] nemal v osvetľovacích sústavách vôbec vyskytovať. Zabránenie oslneniu je dôležitou zásadou osvetľovania a významným ukazovateľom kvality osvetlenia. Obmedzujúce oslnenie znižuje schopnosť vnímania jemných kontrastov a preto môže dôjsť k zhoršeniu zrakového vnímania vodiča v prevádzke a vodič potom nie je schopný rozoznať dôležité objekty, ovládať svetlomety alebo správne vyhodnotiť kritickú dopravnú situáciu. Oslnenie sa potom podľa [9] stáva nebezpečným nie len pre vodiča ale aj pre ostatných účastníkov dopravnej prevádzky.

## 4.2 Hodnotenie oslnenia na komunikáciách

Ak posudzujeme oslnenie na komunikáciách vo vzťahu k osvetľovacej sústave (nie k vlastnostiam svetlometov motorových vozidiel), tak podľa [1] sa hodnotí jednak oslnenie psychologické, jednak oslnenie fyziologické. Rozbor a hodnotenie psychologického oslnenia v zásade predstavujú dvojaký prístup k rôznym aspektom toho istého vizuálneho problému. Vzájomná funkčná súvislosť oboch druhov oslnení nebola doposiaľ objavená a preskúmaná. Preto sa aj v medzinárodných odporúčaniach posudzujú oba druhy oslnenia oddelene.

Psychologické oslnenie sa skúma zo stanoviska vodiča vozidla, ktoré sa pohybuje po osvetlenej komunikácii. Ide o rušivé oslnenie prejavujúce sa ako pocit zrakovej nepohody nepriaznivo ovplyvňujúci bezpečnosť premávky. Stupeň tohto oslnenia je možno napr. hodnotiť činiteľom psychologického oslnenia  $G$ , pri ktorého výskume sa používala stupnica podľa tab. 4.1.

Činiteľ oslnenia  $G$  závisí na fotometrických vlastnostiach použitých svietidiel a na geometrických parametroch osvetľovacej sústavy. Činiteľ  $G$  psychologického oslnenia sa počíta podľa empirického vzťahu (4.1).

$$G = 13,84 - 3,31 \cdot \log I_{80} + 1,3 \cdot \log \left( \frac{I_{80}}{I_{88}} \right)^{0,5} - 0,08 \cdot \log \left( \frac{I_{80}}{I_{88}} \right) + \\ + 1,29 \cdot \log S + 0,97 \cdot \log L_{voz} + 4,41 \cdot \log h' - 1,46 \cdot \log p \quad (4.1)$$

$$G = SLI + 0,97 \cdot \log L_{voz} + 4,41 \cdot \log h' - 1,46 \cdot \log p \quad (4.2)$$

Kde je  $I_{80}$  svietivosť svietidla (cd) zistená vo vertikálnej fotometrickej rovine rovnobežnej s osou komunikácie pod uhlom  $80^\circ$  od zvislice a  $I_{88}$  svietivosť svietidla (cd) zistená vo vertikálnej fotometrickej rovine rovnobežnej s osou komunikácie pod uhlom  $88^\circ$  od zvislice. Veličina  $S$  vyjadruje veľkosť priemetu svietiacej plochy svietidla ( $m^2$ ) do roviny kolmej k smeru pod uhlom  $76^\circ$  od zvislice vo fotometrickej rovine rovnobežnej s osou komunikácie. Priemerný jas povrchu vozovky  $L_{voz}$  ( $cd \cdot m^{-2}$ ),  $h'$  je výška (m) svetelného streda svietidla nad úrovňou oka pozorovateľa (výška oka pozorovateľa nad vozovkou sa zvyčajne uvažuje 1,5 m),  $p$  je počet jednozdrojových svetelných miest na úseku priamej komunikácie o dĺžke 1 km a SLI tzv. kontrola, parameter používaný pre hodnotenie oslnenia v klasifikácii svetidiel pre osvetlenie pozemných komunikácií, viď vzťah (4.2).

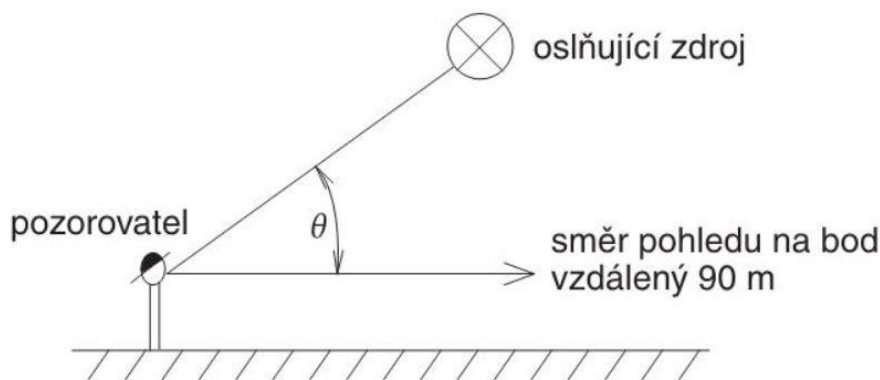
Odporúča sa, aby boli minimálne hodnoty činiteľov oslnenia na diaľniciach a rýchlostných cestách  $G_{min}=7$ , na „sberných“ komunikáciách pri tmavom povrchu vozovky  $G_{min}=6$  a pri svetlom povrchu  $G_{min}=5$ , a na „obslužných“ komunikáciách pri tmavom povrchu vozovky  $G_{min}=5$  a pri svetlom povrchu  $G_{min}=4$ .

Vzorec pre hodnotenie psychologického oslnenia vo verejnom osvetlení má nasledujúcu platnosť a obmedzenia:

- a) možno ho použiť pre akýkoľvek druh osvetľovacej sústavy,
- b) možno ho použiť iba pre priame úseky komunikácií o dĺžke aspoň 300 m s pravidelným rozmiestnením svetelných miest,
- c) dvojzdrojové svietidlá možno hodnotiť ak jednozdrojové s dvojnásobnou hodnotou svetelného toku, avšak s príslušnými hodnotami svietivosti  $I_{80}$  a  $I_{88}$ ,
- d) možno ho použiť v intervaloch hodnôt jednotlivých veličín :
  - $I_{80} = 50$  až  $7000$  cd,
  - $I_{80} : I_{88} = 1$  až  $50$ ,
  - $L_p = 0,3$  až  $7$   $cd \cdot m^{-2}$ ,
  - $S = 0,007$  až  $0,4$   $m^2$ ,
  - $h' = 5$  až  $20$  m,
  - $p = 20$  až  $100$ .
- e) nemožno ho použiť pre komunikácie, kde adaptačný stav zraku vodiča významne ovplyvňujú aj iné plochy v zornom poli než povrch vozovky, napr. výklady obchodov,
- f) nemožno ho použiť pre osvetľovacie sústavy s vysokými stožiarimi,
- g) nemožno ho použiť pre nepravidelné usporiadanie svetidiel v zornom poli, napr. zložitejšie križovatky apod.

Hodnotenie psychologického oslnenia v sústavách verejného osvetlenia popísanou metódou nie je zatiaľ zahrnuté do požiadaviek súčasných európskych noriem pre osvetľovanie pozemných komunikácií.

Pri skúmaní fyziologického oslnenia sa posudzujú svetelno-technické vlastnosti sústavy z hľadiska možnosti zhoršenia viditeľnosti, a to jak zvýšenie prahu (prahový prírastok  $f_{TI}$ ) rozlíšiteľnosti daného skúšobného objektu typického pre zrakové vnímanie vodiča. Výpočet relatívneho zvýšenia prahu rozlíšiteľnosti sa vždy vzťahuje k určitému predom zvolenému postaveniu pozorovateľa na komunikácii. Pre každé svietidlo, ktorého jas ovplyvňuje pozorovateľa (nachádzajúceho sa v spomenutom predpokladanom postavení), sa určí uhol  $\theta$  medzi popísaným smerom pohľadu a smerom spojnice svietidla s okom pozorovateľa (obr. 4.3).



Obr. 4.3: Vymedzenie uhlu théta [1].

V mieste oka pozorovateľa (1,5 m nad vozovkou) v rovine kolmej k ose pohľadu sa vypočíta osvetlenosť  $E$  (odpovedajúcu svietivosť  $I$  svietidla v smere k pozorovateľovi).

Pre zvolené postavenie pozorovateľa a pre každé oslňujúce svietidlo  $I$  sa potom vypočíta ekvivalentný závojový jas  $L_{vk}$  vyvolaný týmto svietidlom zo vzťahu (4.3).

$$L_{vk} = k_v \frac{E_{zd}}{\vartheta_{zd}^2} \quad (cd \cdot m^{-2}; -, lx, ^\circ) \quad (4.3)$$

Kde  $E_{zd}$  je osvetlenosť v mieste oka pozorovateľa v rovine kolmej k ose pohľadu vyvolaná  $k$ -tým svietidlom ( $lx$ ),  $\vartheta_{zd}$  uhol medzi smerom pohľadu pozorovateľa a smerom spojnice svetelného streda uvažovaného svietidla s okom pozorovateľa ( $^\circ$ ) a  $k_v$  konštanta závislá na veku pozorovateľa (rok), napr. pre vek pozorovateľa 23 rokov je  $k_v = 10$ , pre 60 rokov je  $k_v = 16,43$ . Pre iný vek pozorovateľa  $V$  sa konštanta  $k_v$  vypočíta zo vzťahu (4.4).

$$k_v = 9,86 \left[ 1 + \left( \frac{V}{66,4} \right)^4 \right] \quad (-; -) \quad (4.4)$$



Výsledná hodnota ekvivalentného závojového jas  $L_v$  pre skupinu  $n$  svietidiel sa stanoví súčtom čiastkových hodnôt  $L_{vk}$ .

$$L_v = \sum_{k=1}^n L_{vk} \quad (cd \cdot m^{-2}; cd \cdot m^{-2}) \quad (4.5)$$

Podľa normy ČSN EN 13201-3:2015 jas  $L_{vk}$  závisí na uhle  $\vartheta_{zd}$  nasledovne:

$$L_{vk} = 9,86 \left[ 1 + \left( \frac{V}{66,4} \right)^4 \right] \cdot \frac{E_{zd}}{\vartheta_{zd}^2} \quad \text{keď platí: } 1,5^\circ < \vartheta_i \leq 60^\circ \quad (4.6)$$

$$L_{vk} = E_{zd} \cdot \left[ \frac{10}{\vartheta_{zd}^3} + \left( \frac{5}{\vartheta_{zd}^2} \right) \cdot \left( \frac{V}{66,4} \right)^4 \right] \quad \text{keď platí: } 0,1^\circ < \vartheta_i \leq 1,5^\circ \quad (4.7)$$

Vzťah (4.7) je využívaný len vo veľmi vzácných prípadoch, kedy sú svietidlá veľmi blízko v rovine pohľadu pozorovateľa.

Prahový prírastok  $f_{TI}$  sa určí pre stanovený jas  $L_v$  a pre počiatkový priemerný jas vozovky  $L_p$  z empirického vzťahu (4.8).

$$f_{TI} = 65 \cdot \frac{L_v}{L_p^{0,8}} \quad (\%; cd \cdot m^{-2}, cd \cdot m^{-2}) \quad (4.8)$$

Vzťah (4.8) platí pre počiatkový priemerný jas vozovky  $L_p$  v rozmedzí 0,05 až 5  $cd \cdot m^{-2}$  vypočítaný pre nové svietidlá a pre svetelné zdroje vyžarujúce nominálny svetelný tok. Oko pozorovateľa v predpokladanej výške 1,5 m nad komunikáciou sa postupne umiestňuje do osi každého jazdného pruhu a pozdĺžne sa na začiatku výpočtu umiestni pred polom kontrolných bodov vo vzdialenosti  $x_d$  určenej zo vzťahu (4.9).

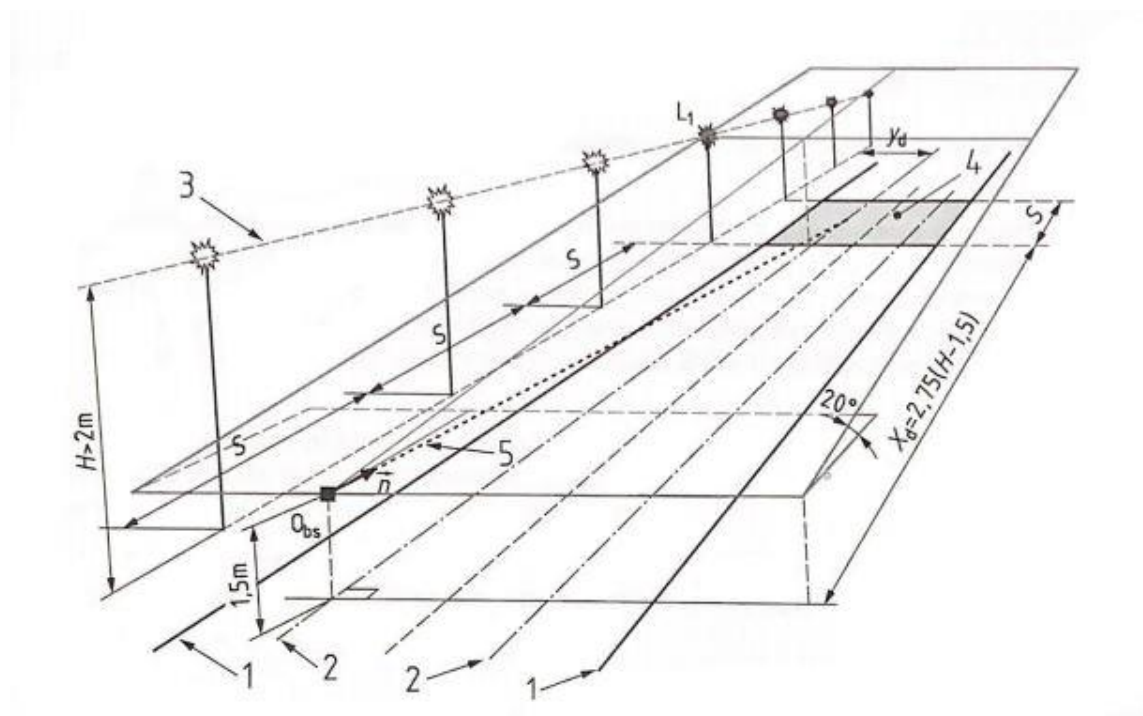
$$x_d = 2,75 \cdot (H - 1,5) \quad (m; m) \quad (4.9)$$

Kde  $H$  je montážna výška uvažovaného svietidla (m).

Hodnota  $\vartheta_{zd}$  môže byť podľa [11] určená ako skalárny produkt zo vzťahu (4.10).

$$\vartheta_{zd} = \arccos \left[ \frac{(x_{Lk} - x_{Obs}) \cdot \cos \alpha + (z_{Lk} - z_{Obs}) \cdot \sin \alpha}{\sqrt{(x_{Lk} - x_{Obs})^2 + (y_{Lk} - y_{Obs})^2 + (z_{Lk} - z_{Obs})^2}} \right] \quad (4.10)$$

Kde  $x_{Lk}$ ,  $y_{Lk}$  a  $z_{Lk}$  sú súradnice k-teho zdroja;  $x_{Obs}$ ,  $y_{Obs}$  a  $z_{Obs}$  sú súradnice oka pozorovateľa a  $\alpha = -1^\circ$  je fixný uhol roviny pohľadu pozorovateľa.



Obr. 4.4: Svetelné zdroje umiestnené pred oblasťou kalkulácie [11].

Obr. 4.4 popisuje meranie prahového prírastku  $f_{TI}$  na komunikácii. Číslo 1 označuje okraje vozovky, číslo 2 stredy jednotlivých jazdných pruhov, číslo 3 líniu svietidiel, číslo 4 ukazuje pole, kde bude uskutočňované meranie a číslo 5 ukazuje smer pohľadu pozorovateľa. Vyplnené (tmavé) svietidlá symbolizujú svietidlá, ktoré sú uvažované pri výpočte a naopak prázdne (biele) svietidlá zase tie, ktoré sa pri výpočte nebudú uplatňovať.

Do súčtu vo vzťahu (4.6) sa zahrnú svietidlá v smere pohľadu až do vzdialenosti 500 m v každej rade svietidiel. Svietidlá nad medznou rovinou, ktorá je vzhľadom k vodorovnej rovine sklonená pod uhlom  $20^\circ$ , prechádza okom pozorovateľa a pretína komunikáciu v priečnom smere, sa z výpočtu vylúči.

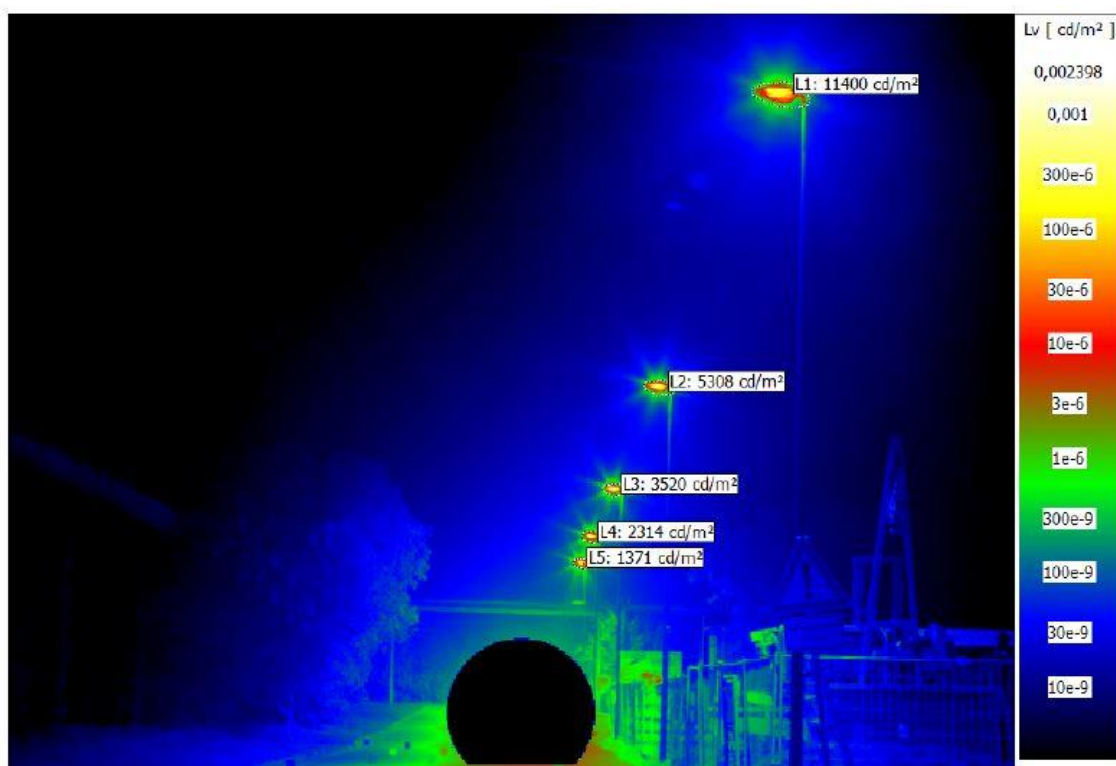
Výpočty prahových prírastkov sa začnú v každom jazdnom pruhu pri pozorovateľovi umiestnenom v osi pruhu a pri pozdĺžnej počiatkovej polohe pozorovateľa (vo vzdialenosti  $lx_d$  pred polom kontrolných bodov) a pokračujú pre pozorovateľa postupne premiestňovaného po krokoch rovnakých ako je pozdĺžna rozteč bodov pre výpočet jas. V každom prípade sa k výpočtu použije počiatkový priemerný jas komunikácie odpovedajúci polohe pozorovateľa. Zo všetkých vypočítaných prahových prírastkov  $f_{TI}$  sa vyberie najvyššia hodnota, ktorá je rozhodujúca pre kontrolu a porovnanie s najväčšou dovolenou hodnotou  $f_{TI}$  pre konkrétny typ a zatriedenie komunikácie.

### 4.3 Praktické meranie hodnoty $f_{TI}$ pomocou metódy ILMD

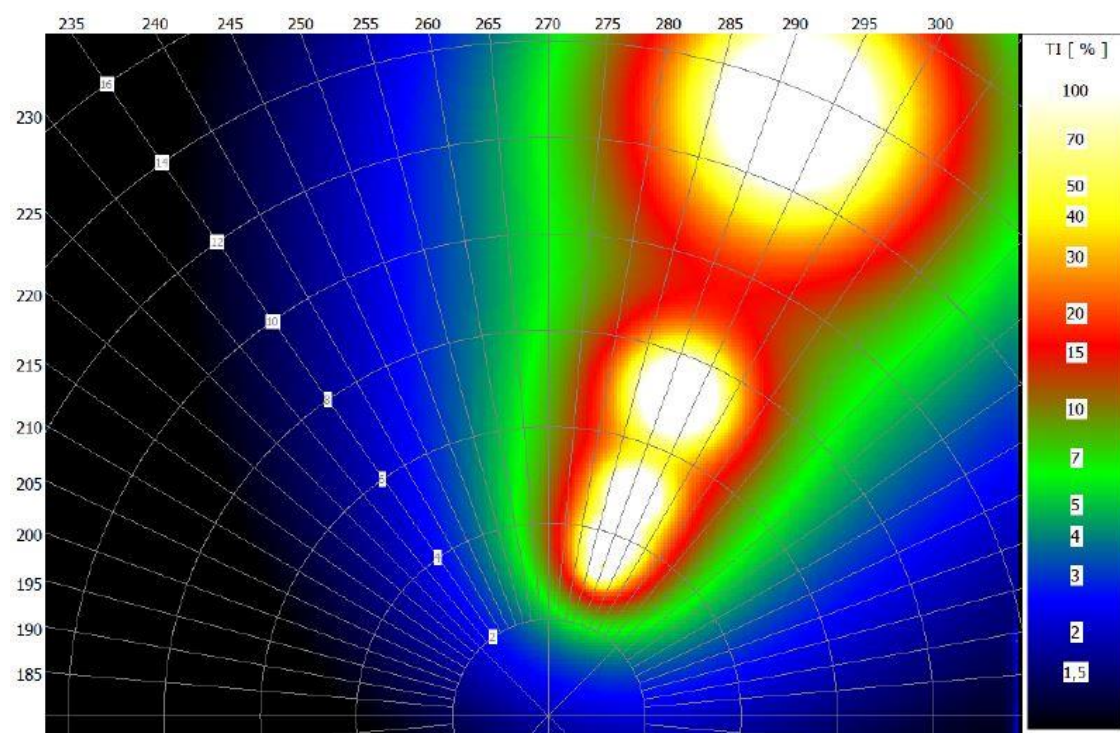
V roku 2014 nemecký inžinier T.Porsch uskutočnil so svojim tímom meranie prahového prírastku  $f_{TI}$  na komunikácii pomocou metódy ILMD (Imaging luminance measuring devices). Táto metóda je podľa [10] založená na použití zariadení, ktoré dokážu snímať jas. Cieľom bolo nielen analyzovať jas z fotografie ale aj extrahovať relevantné informácie o vplyve pozície na hodnoty meraných jasov. Ďalším dôvodom realizácie merania bolo zosúladiť hodnoty vypočítané a zmerané k čomu sa malo dospieť pomocou ILMD.

Na obr. 4.5 a obr. 4.6 je možno vidieť výsledky z ich merania pri použití ILMD a vhodného softvérového programu. Je tu vidieť distribúcia jasov od jednotlivých zdrojov ako aj distribúcia prahového prírastku  $f_{TI}$ .

Toto meranie slúži ako inšpirácia pre praktickú časť tejto práce pri využívaní obdobného počítačového programu na spracovanie nasnímaných scén jasovým analyzátorom.



Obr. 4.5: Distribúcia závojového jasov a priemerné jasov detegovaných zdrojov oslnenia [10].



Obr. 4.6: Distribúcia prahového prírastku  $f_{TI}$  [10].

## **5. MERANIE OSLNENIA**

Na meranie oslnenia je vo všeobecnosti podľa normy ČSN EN 13201 potrebné poznať rozloženie jasů v oku pozorovateľa. Najpresnejším spôsobom ako ho určiť je využitie zariadenia, ktoré sa nazýva jasový analyzátor.

### **5.1 Jasový analyzátor**

Tento pojem popisuje kalibrovaný digitálny fotoaparát. V dnešnej dobe používajú fotoaparáty pre záznam obrazu CCD alebo CMOS snímače, ktoré umožňujú zaznamenať scénu priestoru s informáciami o rozložení jasů. Výstupom je fotografia s veľkým rozlíšením, čo je dátový záznam obrazu pôvodnej scény.

Jasový analyzátor sa skladá z digitálneho fotoaparátu umiestneného podľa požadovaného merania. Ak chceme docieľiť presného snímku, teda získať relevantné dáta, tak je potrebné fotoaparát pevne uchytiť, poprípade v nutnosti pohybu použiť statív. Zaznamenaná scéna sa spracuje pomocou softvérového nástroja výsledkom čoho je jasová mapa.

### **5.2 LumiDISP**

Ako popisuje [13], tak je to špeciálne vyvíjaný program slúžiaci na spracovanie surových dát z kalibrovaného fotoaparátu, ktoré prostredníctvom kalibračných funkcií prevádza na jasovú informáciu, ktorej výsledkom môže byť tzv. jasová mapa. Z tejto mapy je potom možné robiť celú radu rôznych výpočtov a štatistík, ako napríklad jasové rezy, histogramy, výpočty kontrastov či meranie uhlových vzdialeností. Rozšírené funkcie potom ponúkajú skladanie fotografií do HDR (High Dynamic Range) obrazu, výpočty oslnenia podľa metodiky UGR, mapovanie pravouhlej siete na perspektívne plochy (napr. na vozovku) a analýzu jasů v referenčných bodoch mriežky. Pomocou tohto softvéru je možné diaľkovo ovládať fotoaparát vrátane zaostrovania a živého náhľadu. Softvér ďalej umožňuje :

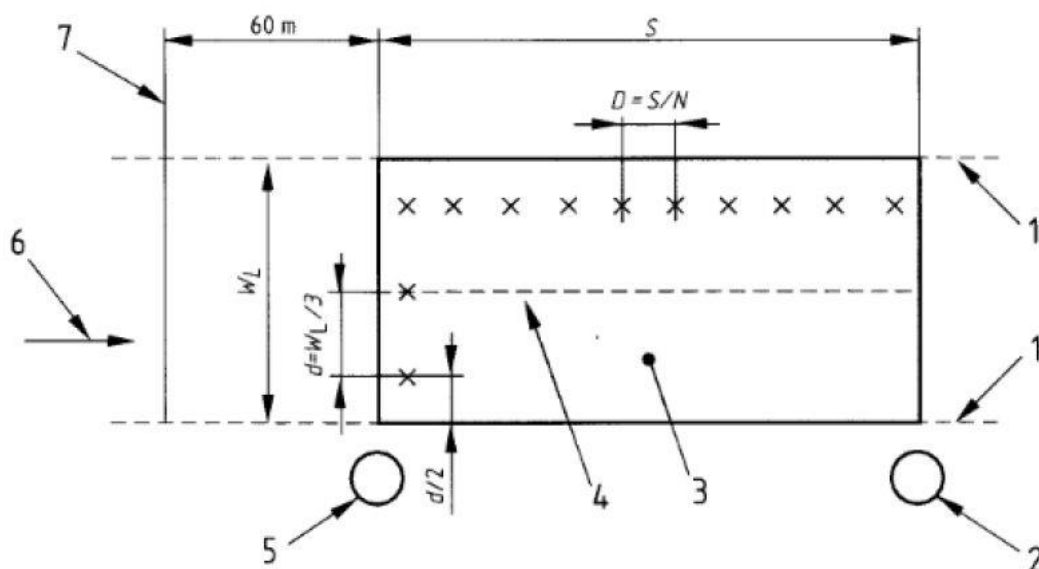
- databázové spracovanie a uloženie výsledkov s pokročilými metódami vyhľadávania,
- vstavané funkcie pre zobrazenie rezov či histogramov,
- export číselných dát a grafov,
- vytváranie snímacích sekvencií pre rôzne typy meraní.

### **5.3 Určenie poľa pre meranie rozloženia jasů na komunikácii**

Výpočtové pole je určené podľa normy ČSN EN 13201-3, ktorá určuje, že toto pole sa nachádza medzi svietidlami osvetľujúcimi komunikáciu. Začiatok poľa je vzdialený 60 metrov od pozorovateľa. Ak má osvetľovacia sústava viac než jednu radu svietidiel

a rozostup svietidiel v jednotlivých radách sa líši, potom výpočtové pole uvažujeme medzi dvoma svietidlami rady s väčším alebo najväčším rozostupom.

Výpočtové body musia byť rovnomerne rozložené vo výpočtovom poli, podľa obr. 5.1. Prvé a posledné priečne rady výpočtových bodov sú od hranice výpočtového poľa vzdialené jednu polovicu pozdĺžneho rozostupu medzi bodmi.



1 – Okraj jazdeného pruhu, 2 – Posledné svietidlo vo výpočtovom poli, 3 – Výpočtové pole, 4 – Os jazdného pruhu, 5 – Prvé svietidlo vo výpočtovom poli, 6 – Smer pozorovania, 7 – Poloha pozorovateľa v pozdĺžnom smere, x – označuje rady výpočtových bodov v priečnom a pozdĺžnom smere

Obr. 5.1: Poloha výpočtových bodov v jazdnom pruhu [11].

Rozostup bodov v pozdĺžnom smere musí byť určený nasledujúco, podľa vzťahu (5.1).

$$D = \frac{S}{N} \quad (m; m, -) \quad (5.1)$$

Kde  $D$  je rozostup medzi bodmi v pozdĺžnom smere,  $S$  je rozostup svietidiel rovnakej rady a  $N$  je počet výpočtových bodov v pozdĺžnom smere dosahujúc hodnôt pre  $S \leq 30$  m je  $N = 10$  a pre  $S > 30$  m je najmenšie celé číslo splňujúce podmienku  $D \leq 3$  m. Prvý priečny rad výpočtových bodov je umiestnený vo vzdialenosti  $D/2$  za prvým svietidlom z pohľadu pozorovateľa.

Rozostup bodov v priečnom smere je určený podľa vzťahu (5.2).

$$d = \frac{W_L}{3} \quad (m; m) \quad (5.2)$$

Kde  $d$  je rozostup medzi bodmi v priečnom smere a  $W_L$  je šírka jazdného pruhu. Najodľahlejšie výpočtové body sú vzdialené  $d/2$  od okrajov jazdného pruhu.

Pre výpočty jasů je oko pozorovateľa vo výške 1,5 metru nad úrovňou povrchu komunikácie. Lúnia pohľadu smeruje  $1^\circ$  pod vodorovnú rovinu a leží v pozdĺžnej zvislej rovine prechádzajúcej okom pozorovateľa. Priemerný jas, celková rovnomernosť jasů a prahový prírastok sa vypočítajú pre celú komunikáciu pre každú polohu pozorovateľa. Pozdĺžna rovnomernosť jasů sa vypočíta v osi každého jazdného pruhu. V prípade stredného jasů, celkovej rovnomernosti jasů a pozdĺžnej rovnomernosti jasů sú v každom z uvedených prípadov smerodajné najnižšie hodnoty, v prípade prahového prírastku je smerodajná najvyššia hodnota.

Priemerný jas komunikácie sa v závislosti od veľkosti uhlu medzi smerom pohľadu a priamkou vedenou od pozorovateľa ku  $k$ -tému svietidlu vypočíta podľa vzťahu (4.6) alebo (4.7). V pozdĺžnom smere sa pozorovateľ umiestňuje podľa vzťahu (4.9) a pre každú jeho polohu sú vypočítavané potrebné hodnoty.

## **5.4 Svietidlá zahrnuté do výpočtu**

Hranica oblasti, z ktorej sú svietidlá pri bodovom výpočte jasů zahrnuté do výpočtu, je určená podľa normy ČSN EN 13201-3 nasledujúco:

- Hranica na obe strany od pozorovateľa: aspoň päťnásobok montážnej výšky  $H$  na obe strany od výpočtového bodu;
- Hranica najvzdialenejšia od pozorovateľa: aspoň  $12H$  od výpočtového bodu najvzdialenejšieho od pozorovateľa;
- Hranica najbližšia pozorovateľovi: aspoň  $5H$  do výpočtového bodu v smere k pozorovateľovi
- Svietidlá nad medznou rovinou, ktorá je sklonená voči vodorovnej rovine pod uhlom  $20^\circ$ , prechádza okom pozorovateľa a pretína komunikáciu v priečnom smere, sa z výpočtu vylúčia.

## 6. EXPERIMENTÁLNE MERANIE OSLNENIA

Táto kapitola je venovaná experimentálnemu meraniu oslnenia od exteriérovej osvetľovacej sústavy. K tomuto meraniu bola vybraná ulica Technická, konkrétne úsek cesty nachádzajúci sa za budovou Fakulty Elektrotechniky a komunikačných technológií T12 (viď príloha 6 a príloha 7). Tento úsek bol vybraný z dôvodu pravidelného rozloženia svetelných zdrojov a minimálneho vyťaženia počas neskorých večerných hodín.

Na samotné meranie budú použité 3 rôzne objektívy, ktoré budú medzi sebou porovnané, aby bolo možné posúdiť vhodnosť ich použitia. Konkrétne sa jedná o objektívy 135 mm, 50 mm a 4.5 mm, pričom objektív 50 mm bude použitý na meranie na šírku ako aj na výšku.

### 6.1 Postup merania

Na základe teoretických poznatkov z normy ČSN EN 13201 popísaných v kapitole 5.3 je možné určiť výpočtové pole a podľa vzťahu (4.9) stanoviť miesta merania (poloha pozorovateľa). Do tohto vzťahu dosadíme za montážnu výšku svietidla hodnotu 6,9 m, ktorá definuje vzdialenosť medzi vozovkou a svietidlom.

$$x_d = 2,75 \cdot (H - 1,5) = 2,75 \cdot (6,9 - 1,5) = 14,85 \text{ m}$$

Keďže táto hodnota predstavuje maximálny možný rozostup medzi dvoma svietidlami rovnakej rady, tak bola zvolená vzdialenosť meracích bodov ako polovica rozostupu dvoch svietidiel, teda 11 m. Svetelným zdrojom je vysokotlaká sodíková výbojka 150W. Úsek meranej komunikácie má dĺžku 240 m, na ktorej sa nachádza 11 svietidiel verejnej osvetľovacej sústavy, čo predstavuje 14 meracích miest.

Po stanovení meracích miest je potrebné umiestniť fotoaparát do výšky 1,5 m s uhlom  $-1^\circ$  pod rovinu pohľadu. V ďalšom kroku je potrebné určiť expozičné časy ako aj nastavenia clony fotoaparátu, a to pre každý jeden objektív. Tento krok je nevyhnutný pre zaznamenanie jak najnižších, tak aj najvyšších jasov scény a následné vyhotovenie kvalitného jasového snímku. Jednotlivé sekvencie snímania scény sú bližšie popísané v kapitolách venovaných každému objektívu.

Podmienky a parametre merania:

- Počasie – sucho, polooblačno,  $t = 5^\circ\text{C}$ ,
- Vlhkosť – 52 %,
- Atmosférický tlak  $p = 1020 \text{ hPa}$ ,
- Montážna výška svietidla  $H = 6,9 \text{ m}$ ,
- Rozostup stožiarov  $l = 22 \text{ m}$ ,
- Šírka komunikácie  $d = 6 \text{ m}$ ,



- Rozostup meracích miest  $x_d = 11$  m,
- Vzdialenosť aparatúry od okraja vozovky  $d_m = 1,5$  m.

## 6.2 Spracovanie merania

Výsledné dáta obsahujú 10 fotografií pre každé jedno miesto a objektív, čo znamená 40 fotografií z jedného miesta. Každému pixelu z tejto série 10 fotografií je potrebné priradiť jasovú informáciu aby s nimi bolo možné ďalej pracovať. Okrem informácií o jase je pre neskoršie spracovanie nutné priradiť fotografiám taktiež informácie o osvetlenosti, priestorovom uhle a uhle, ktorý zvierá svetelný zdroj s rovinou prechádzajúcou okom pozorovateľa. Po priradení týchto informácií je možné vytvoriť jasovú HDR fotografiu. Celý tento proces prebieha v programe LumiDISP.

Po spracovaní všetkých fotografií je možné prejsť k určeniu potrebných parametrov k výpočtu prahového prírastku  $f_{\pi}$ . Ako prvé je potrebné do jasovej HDR fotografie pridať pole na výpočet priemerného jasu komunikácie. Parametre tohto poľa sú bližšie popísané v kapitole 5.3. Okrem priemerného jasu komunikácie je potrebné určiť závojový jas od všetkých svietidiel, ktoré spadajú do podmienok popísaných v kapitole 5.4. Pre určenie závojového jasu je potrebné použiť v programe LumiDISP funkciu na vymaskovanie oblastí, v tomto prípade oblastí s jasom vyšším ako je  $100 \text{ cd.m}^{-2}$ .

Z výsledných HDR fotografií obsahujúcich výpočtové pole a vymaskovanie je možné pomocou funkcie dávkového spracovania vypočítať priemerný jas komunikácie  $L_{voz}$ , príspevok osvetlenia od konkrétneho svetelného zdroja  $E_{zd}$  a uhol, ktorý zvierá svetelný zdroj a rovina prechádzajúca okom pozorovateľa  $\vartheta_{zd}$ . Teraz je možné pomocou vzťahov (4.6) a (4.7) vypočítať čiastkové závojové jasy a následne pomocou vzťahu (4.5) určiť celkový závojový jas. Potom zo znalosti priemerného jasu komunikácie a celkového závojového jasu je možné pomocou vzťahu (4.8) určiť prahový prírastok  $f_{\pi}$ .

Nasledujúce podkapitoly popisujú konkrétne nastavenia expozičných časov, clony a hodnoty ISO pre každý typ objektívu. Okrem toho sú tu zobrazené príklady výsledných fotografií z rovnakého miesta merania pre porovnanie ako aj tabuľka výsledných hodnôt skúmaných parametrov.

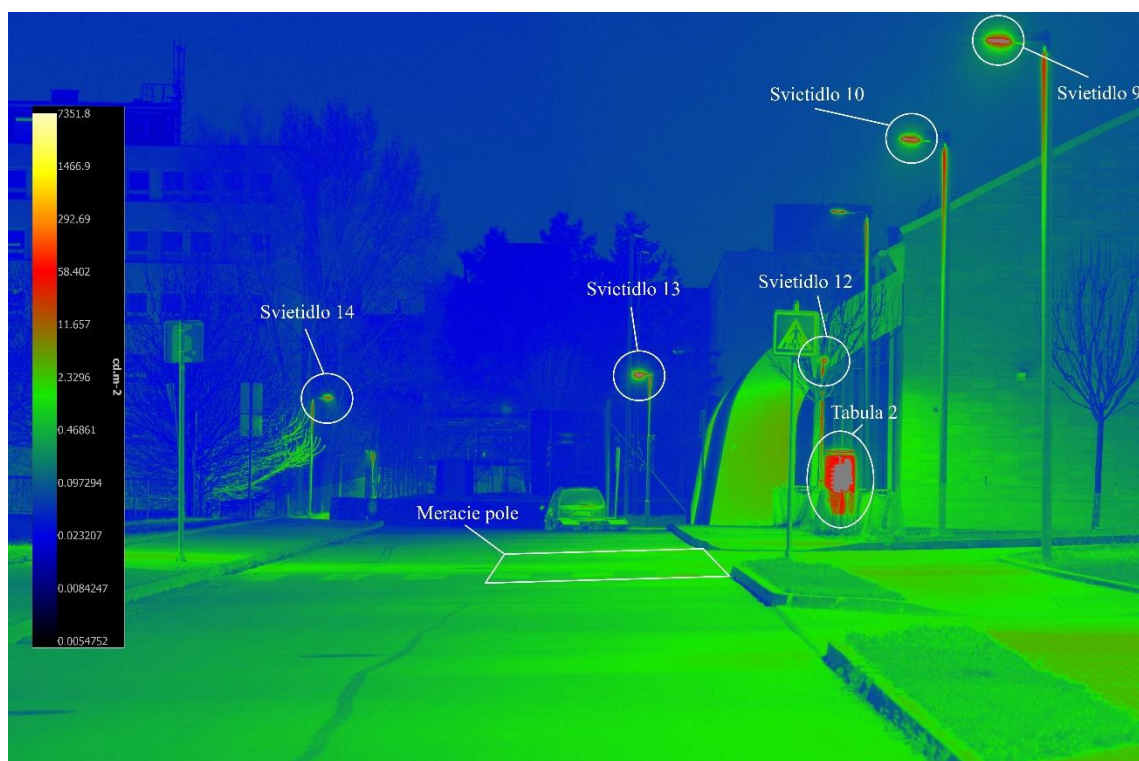
### 6.2.1 Objektív 135 mm

Tento typ objektívu bol určený ako referenčný a teda zvyšné objektívy budú hodnotené na základe výsledkov zistených pomocou objektívu 135 mm. V tab. 6.1 sú zobrazené nastavené hodnoty clony, expozičných časov a čísla ISO pri meraní objektívom 135 mm. Tieto hodnoty boli zvolené aby bolo možné zachytiť všetky jasy, teda od najnižších hodnôt až po tie najvyššie a následne z nich vytvoriť kvalitnú HDR fotografiu.

Tab. 6.1: Zvolené nastavenia clony (aperture), expozičných časov (shutter) a čísla ISO pri meraní objektivom 135 mm

Objektív 135 mm		
Aperture	Shutter	ISO
5,6	3	10 000
8	3	10 000
11	3	10 000
16	3	10 000
16	30	100
16	10	100
16	1	100
16	1/10	100
16	1/100	100
16	1/1000	100

Obr. 6.1 ukazuje výslednú HDR fotografiu pre vybrané miesto na meranom úseku s vyznačenými svietidlami, ktoré boli zahrnuté do výpočtov, podľa normy ČSN EN 13201-3. Taktiež je tu vyznačené pole merania, ktoré bolo umiestnené presne podľa podmienok z normy ČSN EN 13201-3. Konkrétne sa toto pole nachádza medzi svietidlami 9 a 10, pričom začiatok tohto poľa je vzdialený 60 m od pozorovateľa (fotoaparátu).



Obr. 6.1: Výsledná HDR fotografia z miesta 11 fotená objektivom 135 mm.

Svietidlo 11 na obr. 6.1 nie je vyznačené z dôvodu, že jas vychádzajúci z tohto svietidla bol príliš nízky, menší než zvolená minimálna hranica  $100 \text{ cd.m}^{-2}$ . Je to spôsobené poruchou tohto svietidla a má to priamy vplyv na výsledné hodnoty, keďže je predpoklad, že pri správnom fungovaní by sa toto svietidlo výraznejšie podieľalo na osvetlení komunikácie. Naopak svietidlo 13 môže spôsobovať vodičom výrazné oslnenie kvôli jeho polohe. V tomto mieste klesá vozovka a preto svetelný zdroj nie je vo výške 6,9 m vzhľadom k meranému úseku, ale podstatne nižšie čoho výsledkom je nízky uhol  $\vartheta_{zd}$ .

Výsledné namerané hodnoty osvetlenia  $E_{zd}$ , uhlu  $\vartheta_{zd}$  a priemerného jasu komunikácie  $L_{voz}$  sú zapísané v tab. 6.2 a vypočítané hodnoty závojového jasu  $L_v$  a prahového prírastku  $f_{TI}$  v tab. 6.3. Vyznačený riadok v tab. 6.2 označuje svietidlo, ktorého uhol  $\vartheta_{zd}$  je menší ako  $1,5^\circ$  a teda na výpočet závojového jasu sa musí použiť iný vzťah než pri ostatných svietidlách. Keďže sa po tomto úseku pohybujú ľudia rôznej vekovej kategórie, tak boli spravené výpočty pre vek 23 rokov a následne pre starších ľudí vo veku 70 rokov. Tieto výpočty boli doplnené aj o vekovú kategóriu 60 rokov, pre názornú ukážku ako sa zmení vnímanie oslnenia počas 10 rokov.

Tab. 6.2: Namerané hodnoty z miesta 11 pre objektív 135 mm.

Miesto 11		$E_{zd} [10^{-3} \text{ lx}]$	$\vartheta_{zd} [^\circ]$	$L_{voz} [\text{cd.m}^{-2}]$
135 mm	Svietidlo 13	1,2291	1,24	1,1299
	Svietidlo 12	0,4721	4,78	
	Svietidlo 10	3,0114	7,97	
	Svietidlo 9	13,2725	10,45	
	Tabula 2	9,7192	5,24	
	Svietidlo 14	0,1542	4,82	

Pozn.: Závojový jas svietidla 13 sa počíta podľa vzťahu (4.6) a ostatných svietidiel podľa vzťahu (4.7).

Tab. 6.3: Vypočítané hodnoty závojového jasu a prahového prírastku z miesta 11 pre objektív 135 mm.

$L_v [\text{cd.m}^{-2}]$			$f_{TI} [\%]$		
23 rokov	60 rokov	70 rokov	23 rokov	60 rokov	70 rokov
0,0159	0,0228	0,0287	0,9400	1,3433	1,6947

Príklad výpočtu pre vek 23 rokov:

Príspevok závojového jasú od konkrétneho svetidla podľa vzťahov (4.6) a (4.7):

**Svietidlo 13**

$$L_{vk} = E_{zd} \cdot \left[ \frac{10}{\vartheta_{zd}^3} + \left( \frac{5}{\vartheta_{zd}^2} \right) \cdot \left( \frac{V}{66,4} \right)^4 \right] = 1,2291 \cdot 10^{-3} \cdot \left[ \frac{10}{1,24^3} + \left( \frac{5}{1,24^2} \right) \cdot \left( \frac{23}{66,4} \right)^4 \right]$$

$$L_{vk} = \underline{0,0104463 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}}$$

**Svietidlo 12**

$$L_{vk} = 9,86 \cdot \left[ 1 + \left( \frac{V}{66,4} \right)^4 \right] \cdot \frac{E_{zd}}{\vartheta_{zd}^2} = 9,86 \cdot \left[ 1 + \left( \frac{23}{66,4} \right)^4 \right] \cdot \frac{0,4721 \cdot 10^{-3}}{4,78^2}$$

$$L_{vk} = \underline{0,0002069 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}}$$

Celkový závojový jas sa vypočíta podľa vzťahu (4.5):

$$L_v = \sum_{k=1}^n L_{vk} = 0,0104463 + 0,0002069 + 0,0004747 + 0,0012147 + 0,0035368 + 0,0000663 = \underline{0,0159457 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}}$$

Prahový prírastok sa určí podľa vzťahu (4.8):

$$f_{TI} = 65 \cdot \frac{L_v}{L_{voz}^{0,8}} = 65 \cdot \frac{0,0159457}{1,12983977^{0,8}} = \underline{0,94 \%}$$

**Výhody objektívu:**

- meracie pole zaberá väčšie množstvo pixelov,
- lepší detail na meranú oblasť (60m od fotoaparátu),
- presnejšie hodnoty jasov svetidiel.

**Nevýhody objektívu:**

- zachytí svetidlá len v rozsahu uhlu do približne 12°.

## 6.2.2 Objektív 50 mm

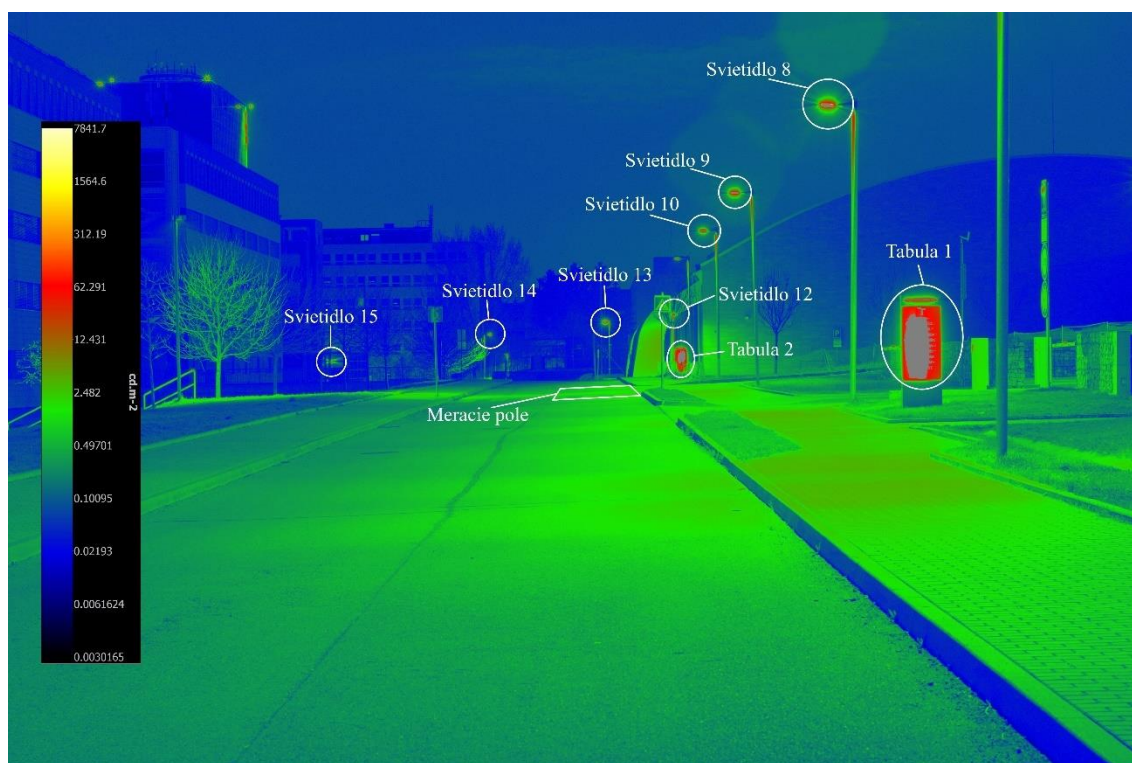
### Landscape

Ako prvá alternatíva k objektívu 135 mm bol zvolený objektív 50 mm pri fotení na šírku (landscape). Nastavené hodnoty expozičných časov, clony a čísla ISO sú zapísané v tab. 6.4. Rovnako ako pri prvom objektíve, tak aj tu boli volené z ohľadom na to, by boli zachytené jak najnižšie, tak aj najvyššie jasy a mohla byť vytvorená kvalitná HDR fotografia.

Tab. 6.4: Zvolené nastavenia clony (aperture), expozičných časov (shutter) a čísla ISO pri meraní objektívom 50 mm (landscape).

Objektív 50 mm		
Aperture	Shutter	ISO
5,6	3	10 000
8	3	10 000
11	3	10 000
16	3	10 000
16	30	100
16	10	100
16	1	100
16	1/10	100
16	1/100	100
16	1/1000	100

Na obr. 6.2 je vidieť výsledná HDR fotografia pri použití objektívu 50 mm (landscape). Na obrázku sú vyznačené svietidlá zahrnuté do výpočtu ako aj meracie pole.



Obr. 6.2: Výsledná HDR fotografia z miesta 11 fotená objektívom 50 mm (landscape).

Pri porovnaní svietidiel, ktoré sa zarátavajú do výpočtu je vidieť rozdiel medzi objektívom 135 mm a práve týmto. Pri použití 50 mm objektívu pribudli do záberu svietidlá 8, 15 a tabula 1. Toto je jeho hlavnou výhodou, keďže pomocou neho dokážeme detegovať svetelné zdroje takmer v plnom rozsahu horizontálneho uhlu. Naopak veľkou

nevýhodou je výrazné zmenšenie počtu pixelov, ktoré zaberá meracie pole alebo samotné svietidlá. V dôsledku toho sú výsledné hodnoty menej presné, než je to u objektívu 135 mm.

Namerané hodnoty pre miesto 11 fotené objektívom 50 mm (landscape) sú zapísané v tab. 6.5. Vyznačený riadok označuje svietidlo, ktorého uhol  $\vartheta_{zd}$  je menší ako  $1,5^\circ$  a k určeniu jeho závoje jas je potrebné použiť vzťah (4.6). Rovnako ako u predchádzajúceho objektívu, aj tu boli vypočítané hodnoty pre vek pozorovateľa 23 rokov, 60 rokov a 70 rokov. Tieto hodnoty sú zapísané v tab. 6.6.

Tab. 6.5: Namerané hodnoty z miesta 11 pre objektív 50 mm (landscape).

Miesto 11		$E_{zd} [10^{-3} \text{lx}]$	$\vartheta_{zd} [^\circ]$	$L_{voz} [\text{cd.m}^{-2}]$
50 mm (landscape)	Svietidlo 13	0,1572	1,41	1,1271
	Svietidlo 12	0,0702	2,36	
	Svietidlo 10	0,4223	3,88	
	Svietidlo 9	1,8796	4,82	
	Svietidlo 8	6,1223	7,24	
	Tabula 2	1,4048	2,01	
	Tabula 1	26,8854	6,08	
	Svietidlo 15	0,0057	4,68	
	Svietidlo 14	0,0127	1,94	

Pozn.: Závojevý jas svietidla 13 sa počíta podľa vzťahu (4.6) a ostatných svietidiel podľa vzťahu (4.7).

Tab. 6.6: Vypočítané hodnoty závoje jas a prahového prírastku z miesta 11 pre objektív 50 mm (landscape).

$L_v [\text{cd.m}^{-2}]$			$f_{TI} [\%]$		
23 rokov	60 rokov	70 rokov	23 rokov	60 rokov	70 rokov
0,0141	0,0229	0,0306	0,8354	1,3551	1,8081

Postup výpočtu je totožný s tým v kapitole 6.2.1 pre objektív 135 mm, akurát v tomto prípade je nutné do výpočtov zahrnúť aj svietidlá 8, 15 a tabula 1.

#### Výhody objektívu:

- podstatne širší rozsah uhlov v horizontálnom smere v porovnaní s referenčným objektívom (zachytí podstatne väčšiu oblasť v horizontálnej rovine),
- širší rozsah uhlov vo vertikálnom smere v porovnaní s referenčným objektívom (zachytí väčšiu oblasť vo vertikálnom smere).



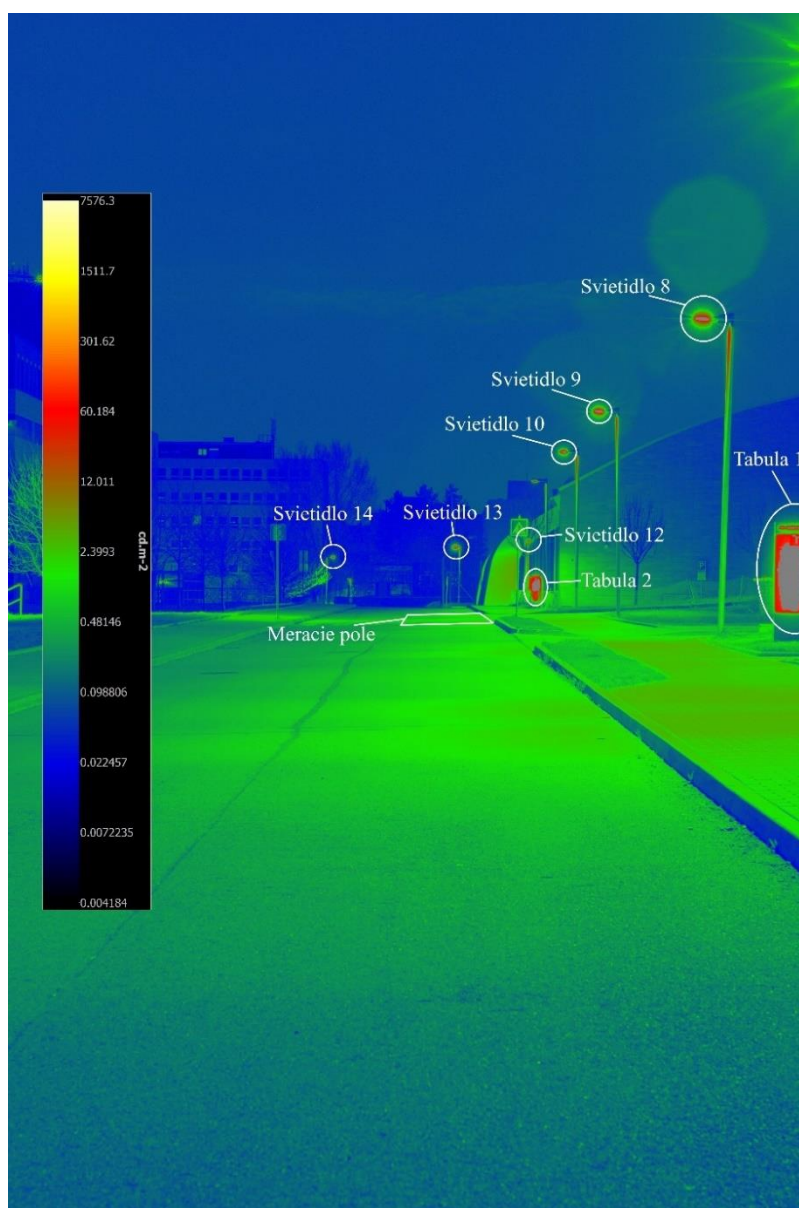
**Nevýhody objektívu:**

- menší počet pixelov pripadajúcich na meraciu oblasť,
- menší počet pixelov pripadajúcich na svetelný zdroj.

**Portrait**

Ďalšou alternatívou je znova využitie objektívu 50 mm, ale tentokrát s orientáciou na výšku (portrait). Hodnoty expozičných časov, clony a čísla ISO boli použité identické ako pri fotení s orientáciou na šírku, a sú zapísané v tab. 6.4.

Na obr. 6.3 je zobrazená výsledná HDR fotografia pri fotení s 50 mm objektívom na výšku (portrait) s vyznačenými svetidlami, ktoré sa započítavajú do výpočtov a vyznačeným meracím polom.



Obr. 6.3: Výsledná HDR fotografia z miesta 11 fotená objektívom 50 mm (portrait).

V porovnaní s objektívom 135 mm a 50 mm landscape je tento spôsob zachytenia scény bližší objektívu 50 mm landscape. Pri porovnaní obr. 6.2 s obr. 6.3 je vidno, že v zábere chýba svietidlo 15 a tabula 1 je na okraji fotografie. Naopak v porovnaní s referenčným objektívom 135 mm je tu v zábere jak svietidlo 8, tak aj tabula 1. Avšak pri tomto experimentálnom meraní sa nevyužila najväčšia výhoda zachytávania scény na výšku, ktorou je vysoký rozsah zachytených svietidiel vo vertikálnom smere. Lepšie využitie by bolo pri vyšších montážnych výškach svietidiel. Rovnako ako u zachytávania scény na šírku, aj tu je veľkou nevýhodou menší počet pixelov prislúchajúcich meraciemu poľu a jednotlivým svetelným zdrojom.

Namerané hodnoty  $E_{zd}$ ,  $\vartheta_{zd}$  a  $L_{voz}$  sú zapísané v tab. 6.7 a vypočítané hodnoty  $L_v$  a  $f_{TI}$  v tab. 6.8. Vyznačený riadok označuje svietidlo 13, ktorého uhol  $\vartheta_{zd}$  je menší ako  $1,5^\circ$  a k určeniu jeho závojevého jasu je potrebné použiť vzťah (4.6). Zhodne s predchádzajúcimi typmi objektívov, tak aj tu bol zvolený vek pozorovateľa 23 rokov, 60 rokov a 70 rokov.

Tab. 6.7: Namerané hodnoty z miesta 11 pre objektív 50 mm (portrait).

Miesto 11		$E_{zd} [10^{-3} \text{lx}]$	$\vartheta_{zd} [^\circ]$	$L_{voz} [\text{cd.m}^{-2}]$
50 mm (portrait)	Svietidlo 13	0,1480	1,47	1,1288
	Svietidlo 12	0,0484	2,53	
	Svietidlo 10	0,4400	4,03	
	Svietidlo 9	1,8634	5,00	
	Svietidlo 8	7,2669	7,49	
	Tabula 2	1,2530	2,25	
	Tabula 1	25,2756	6,40	
	Svietidlo 14	0,0132	1,80	

Pozn.: Závojevý jas svietidla 13 sa počíta podľa vzťahu (4.6) a ostatných svietidiel podľa vzťahu (4.7).

Tab. 6.8: Vypočítané hodnoty závojevého jasu a prahového prírastku z miesta 11 pre objektív 50 mm (portrait).

$L_v [\text{cd.m}^{-2}]$			$f_{TI} [\%]$		
23 rokov	60 rokov	70 rokov	23 rokov	60 rokov	70 rokov
0,0119	0,0193	0,0258	0,7017	1,1387	1,5196



Postup výpočtu je totožný s tým v kapitole 6.2.1 pre objektív 135 mm, akurát v tomto prípade je nutné do výpočtov zahrnúť aj svietidlo 8 a tabuľa 1.

**Výhody objektívu:**

- podstatne širší rozsah uhlov vo vertikálnom smere v porovnaní s referenčným objektívom (zachytí podstatne väčšiu oblasť vo vertikálnej rovine),
- širší rozsah uhlov v horizontálnom smere v porovnaní s referenčným objektívom (zachytí väčšiu oblasť v horizontálnom smere).

**Nevýhody objektívu:**

- menší počet pixelov pripadajúcich na meraciu oblasť,
- menší počet pixelov pripadajúcich na svetelný zdroj.

### 6.2.3 Objektív 4,5 mm (Fish Eye)

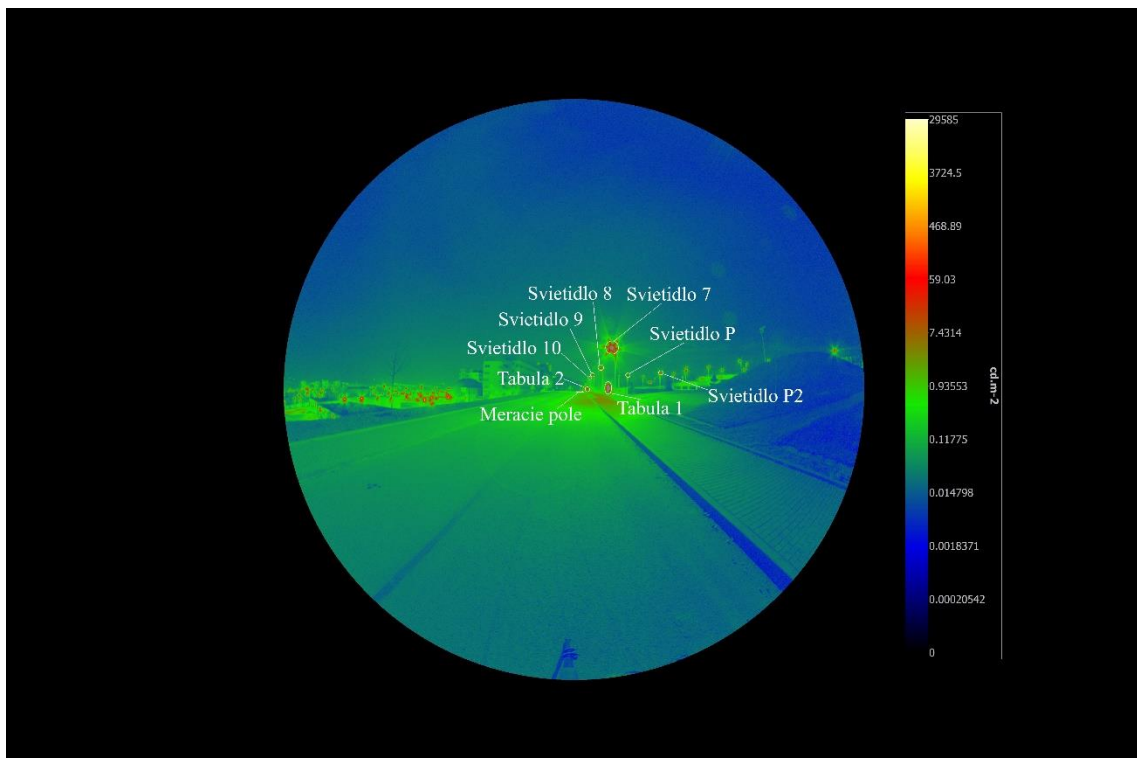
Poslednou alternatívou k referenčnému objektívu 135 mm, ktorá bola testovaná je objektív 4,5 mm alebo inak označovaný ako rybie oko (Fish Eye). Hodnoty expozičných časov, nastavenia clony a čísla ISO použité pri snímaní scény sú zapísané v tab. 6.9. Nastavenia sa v porovnaní s predchádzajúcimi objektívmi líšia len v hodnotách expozičných časov, nakoľko pri tomto objektíve nebolo potrebné nastavovať 0,001s ale stačilo nastaviť ako najnižšiu hodnotu 0,01s. To zaručilo zachytenie všetkých jasov pre vytvorenie kvalitnej HDR fotografie.

Tab. 6.9: Zvolené nastavenia clony (aperture), expozičných časov (shutter) a čísla ISO pri meraní objektívom 4,5 mm (Fish Eye).

Objektív 4,5 mm (Fish Eye)		
Aperture	Shutter	ISO
5,6	3	10 000
8	3	10 000
11	3	10 000
16	3	10 000
16	30	100
16	10	100
16	1	100
16	1/2	100
16	1/10	100
16	1/100	100

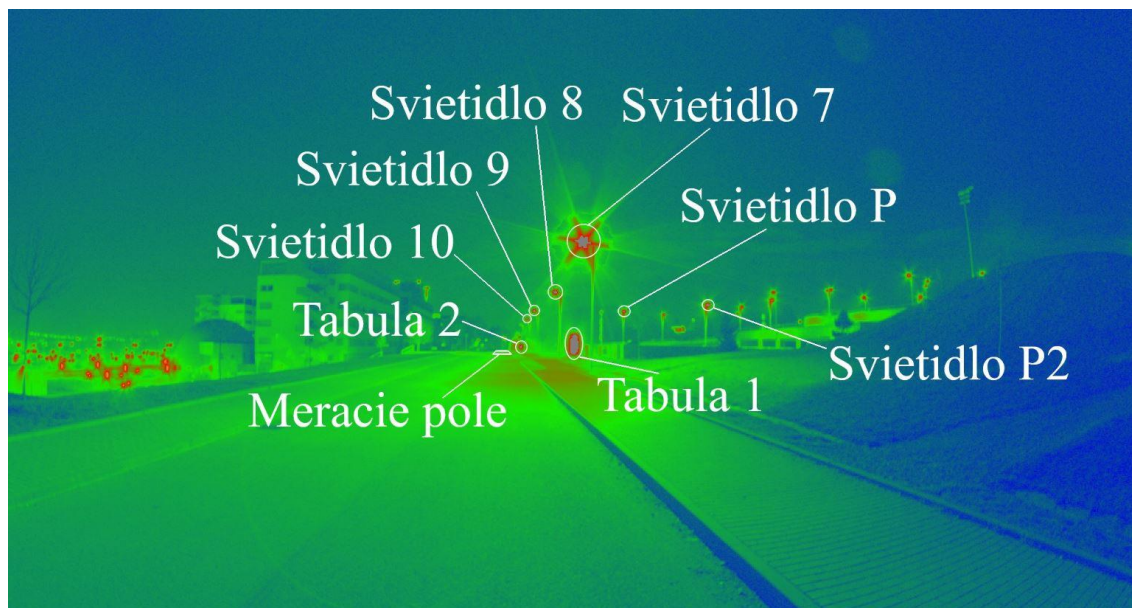
Na obr. 6.4 je možno vidieť výslednú HDR fotografiu z miesta 11 pomocou objektívu 4,5 mm. Na obrázku sú vyznačené svietidlá zahrnuté do výpočtu ako aj meracie pole. Pri tomto objektíve bolo potrebné znížiť minimálnu hranicu jasov potrebnú na zahrnutie svetelného zdroja do výpočtov zo 100 cd.m<sup>-2</sup> na polovičnú hodnotu 50 cd.m<sup>-2</sup>. Ak by sa neurobila táto úprava, tak by do výpočtu bolo zahrnuté len jedno svietidlo (Svietidlo 7)

a ostatné svietidlá by boli ignorované aj keď vieme, že sa podieľajú na osvetľovaní komunikácie v danom úseku.



Obr. 6.4: Výsledná HDR fotografia z miesta 11 fotená objektívom 4,5 mm (Fish Eye).

Hneď z prvého pohľadu je jasné, že tento objektív nie je vhodný k meraniu prahového prírastku. Jeho veľkou výhodou je, že dokáže zachytiť celý polpriestor a teda je veľmi jednoduché určiť, ktoré svietidlá treba zahrnúť do výpočtu, a ktoré naopak vylúčiť. Veľkou nevýhodou avšak je, že meracie pole, ktoré začína 60 m od pozorovateľa nie je na tomto obrázku ani viditeľné, nakoľko zaberá len zopár pixelov. Rovnako je to aj so svietidlami, ktorých jasové informácie vychádzajú len zo zopár jednotiek pixelov. V dôsledku toho sú výsledné dáta veľmi nepresné a nedajú sa z nich získať žiadne relevantné výsledky. Na obr. 6.5 je zobrazený detail centrálnej oblasti obr. 6.4 pre lepšie priblíženie problému s množstvom pixelov prislúchajúcich meracej oblasti a svetelným zdrojom.



Obr. 6.5: Detail centrálnej oblasti výslednej HDR fotografie z objektívu 4,5 mm (Fish Eye).

Namerané hodnoty  $E_{zd}$ ,  $\vartheta_{zd}$  a  $L_{voz}$  sú zapísané v tab. 6.10 a vypočítané hodnoty  $L_v$  a  $f_{TI}$  v tab. 6.11. V tomto prípade žiadny z nameraných uhlov  $\vartheta_{zd}$  nie je menší ako  $1,5^\circ$  a preto sa k výpočtu závojového jasu  $L_{vk}$  použije pri všetkých svietidlách vzťah (4.7).

Tab. 6.10: Namerané hodnoty z miesta 11 pre objektív 4,5 mm (Fish Eye).

Miesto 11		$E_{zd} [10^{-3} \text{lx}]$	$\vartheta_{zd} [^\circ]$	$L_{voz} [\text{cd.m}^{-2}]$
4,5 mm (Fish Eye)	Tabula 1	0,2834	9,46	0,7561
	Tabula 2	0,0068	3,60	
	Svietidlo 10	0,0017	5,29	
	Svietidlo P2	0,0007	19,81	
	Svietidlo 9	0,0084	6,43	
	Svietidlo P	0,0046	15,45	
	Svietidlo 8	0,0332	9,55	
	Svietidlo 7	3,1757	15,61	

Tab. 6.11: Vypočítané hodnoty závojevého jas a prahového prírastku z miesta 11 pre objektív 4,5 mm (Fish Eye).

$L_v$ [cd.m <sup>-2</sup> ]			$f_{TI}$ [%]		
23 rokov	60 rokov	70 rokov	23 rokov	60 rokov	70 rokov
0,0002	0,0003	0,0004	0,0141	0,0232	0,0311

Výpočet je totožný s tým uvedeným v kapitole 6.2.1 pre objektív 135 mm. Výsledné hodnoty nie sú relevantné, keďže bolo zistené, že tento objektív nie je vhodný na meranie prahového prírastku. Uvádzané sú z toho dôvodu, aby bolo možné určiť odchýlku od referenčného objektívu.

**Výhody objektívu:**

- zachytenie celého polpriestoru (pokrytie celého rozsahu 0,1 - 60°).

**Nevýhody objektívu:**

- minimálny počet pixelov prislúchajúcich meracej ploche a svietidlám (jednotky, maximálne nižšie desiatky pixelov),
- celá oblasť merania je príliš malá na to, aby sa s ňou dalo pracovať (umiestniť meracie pole, vymaskovať svietidlá apod.)

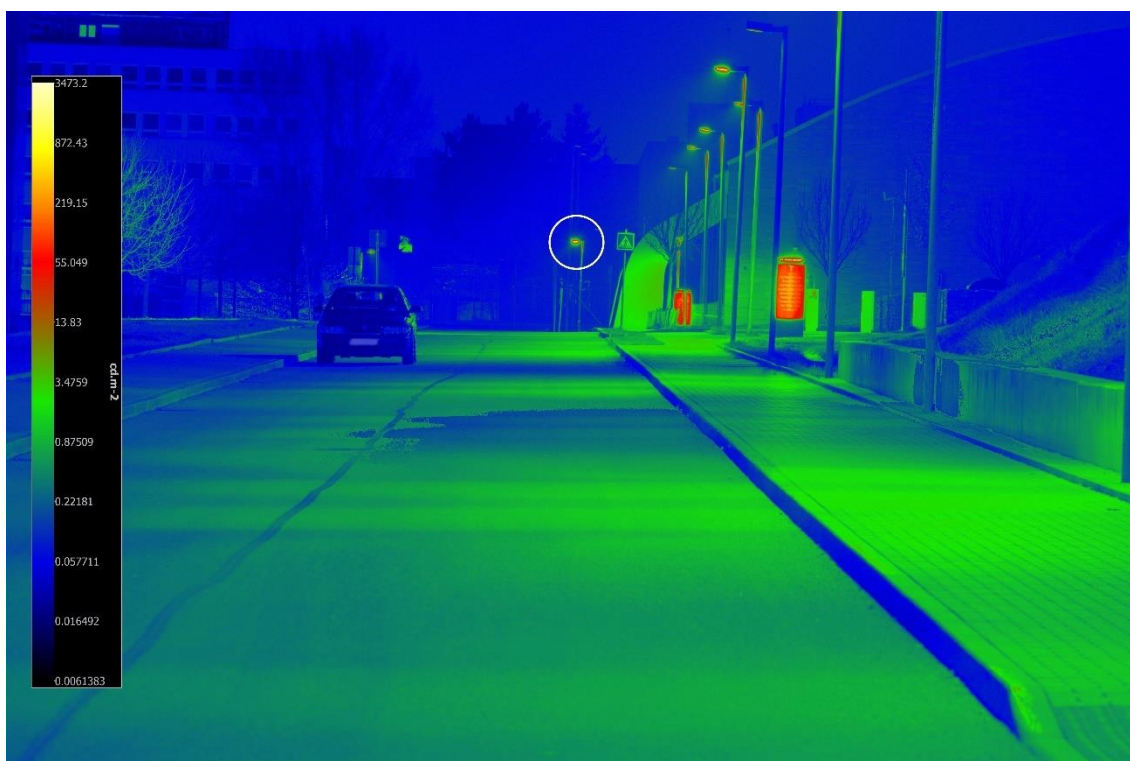
### 6.3 Zhodnotenie merania

Vyhodnocovanie oslnenia je robené podľa normy ČSN EN 13201-3. Na zvolenom úseku komunikácie bolo možné rozložiť 14 meracích miest, tak aby boli splnené všetky parametre zo spomenutej normy. Na každom mieste boli použité 4 spôsoby snímania danej scény, konkrétne objektívom 135 mm, 50 mm landscape, 50 mm portrait a 4,5 mm. V dôsledku toho, že sa na danom úseku pohybujú ľudia všetkých vekových kategórií, výpočet bol spravený pre vekové kategórie 23, 60 a 70 rokov. Podľa normy ČSN EN 13201-1 bola meraná komunikácia zaradená do kategórie M5 (prevaha nemotorových vozidiel, priemerná rýchlosť do 40 km/h, nízka intenzita dopravy, obojsmerná premávka, stredná hustota križovatiek a vyskytujúce sa parkujúce vozidlá). Následne bola podľa normy ČSN EN 13201-2 určená maximálna hodnota prahového prírastku  $f_{TI} < 15$  %.

Tabuľky nameraných a vypočítaných hodnôt pre všetky merané miesta sa nachádzajú v príloha 1. Vyznačené hodnoty indikujú prekročenie limitu maximálneho prahového prírastku. Na obr. 6.6 je zobrazené jediné miesto kde bola prekročená hodnota  $f_{TI}$  s vyznačeným svietidlom, ktoré spôsobuje toto prekročenie. Svietidlo sa nachádza na klesajúcom úseku komunikácie a z tohto dôvodu je svetelný zdroj len tesne nad rovinou prechádzajúcou okom pozorovateľa, čím vytvára výrazný závojevý jas v porovnaní s ostatnými svietidlami. Výsledný prahový prírastok je pre 23 ročného pozorovateľa

menší ako limitná hodnota udávaná normou, avšak pri 60 a 70 ročnom pozorovateľovi je táto hodnota prekročená a teda toto miesto nevyhovuje normatívnym požiadavkám.

Grafy závislosti veľkosti prahového prírastku na polohe pozorovateľa sa nachádzajú v príloha 3, príloha 4 a príloha 5. Z grafov je vidno, že najväčšia zhoda v hodnote prahového prírastku pre všetky objektívy je vo vzdialenosti 55 m a 110 m. V grafoch pre 60 a 70 ročných pozorovateľov je vyznačená hranica maximálnej dovolenej hodnoty prahového prírastku. Ako už bolo spomenuté, tak hodnota  $f_{II}$  bola prekročená len na jednom meracom mieste.



Obr. 6.6: Miesto s prekročenou hodnotou prahového prírastku.

Okrem miesta zobrazeného na obr. 6.6 všetky ostatné vyhovujú normatívnym požiadavkám. Meranie bolo avšak ovplyvnené výpadkami svietidiel 4 a 6, pravdepodobne v dôsledku vnútornej poruchy svietidiel. Doba správneho fungovania týchto svietidiel bola približne 1 minútu, čo ale nestačilo na zachytenie scény zvolenou sekvenciou. Nebolo teda možné zachytiť plný rozsah jasov týchto svietidiel čo ovplyvnilo výslednú HDR fotografiu z miest, do ktorých by boli tieto svietidlá za normálnej prevádzky započítavané.

Na obr. 6.6 sa nachádzajú dve svetelné tabule s výškou 2,15 m, ktoré boli započítavané do výpočtov nakoľko norma ČSN EN 13201 udáva, že všetky svetelné zdroje s výškou nad 2 m musia byť započítané do výpočtov prahového prírastku. Podľa nameraných hodnôt dokonca výrazne ovplyvňujú intenzitou osvetlenia svoje okolie.

## 6.4 Porovnanie objektívov

Cieľom tohto experimentálneho merania bolo porovnať rôzne typy objektívov a ich využiteľnosť pri meraní prahového prírastku. Z výsledných dát boli vypočítané jednotlivé odchýlky prahového prírastku od hodnôt získaných z referenčného objektívu 135 mm. V príloha 2 sa nachádzajú tabuľky s vypočítanými odchýlkami pre jednotlivé objektívy a vek pozorovateľa. Z týchto hodnôt boli následne vypočítané priemerné odchýlky pre daný objektív a vek pozorovateľa, ktoré sú zapísané v tab. 6.12.

Tab. 6.12: Priemerné odchýlky prahového prírastku od hodnôt získaných z referenčného objektívu.

Objektív	Priemerná odchýlka [%]		
	23 rokov	60 rokov	70 rokov
50mm (landscape)	73,65	70,87	70,13
50mm (portrait)	105,34	95,34	90,99
4,5mm (Fish Eye)	93,63	94,97	95,39

Z hodnôt v tab. 6.12 je vidno, že najväčšiu odchýlku má meranie pomocou 50 mm objektívu na výšku (portrait), avšak za bežných okolností by najväčšiu odchýlku mal objektív 4,5 mm. Je to spôsobené tým, že program pri výpočte parametrov pri 4,5 mm objektíve priemeruje hodnoty z minimálneho množstva pixelov a preto nie je možné tieto hodnoty považovať za relevantné dáta. Z týchto vypočítaných odchýlok je však vidieť, že ani jeden z objektívov sa nedokáže hodnotami dostať na úroveň referenčného objektívu 135 mm. Vychádzajúc z obr. 6.6 je možné stanoviť, že objektívy 50 mm a 4,5 mm na tomto mieste zlyhali, keďže nedokázali zistiť prekročenie maximálnej hodnoty prahového prírastku. Tu sa ukazuje, že je lepšie použiť objektív s väčšou ohniskovou vzdialenosťou pre lepšie zachytenie vzdialenejších svetelných zdrojov.

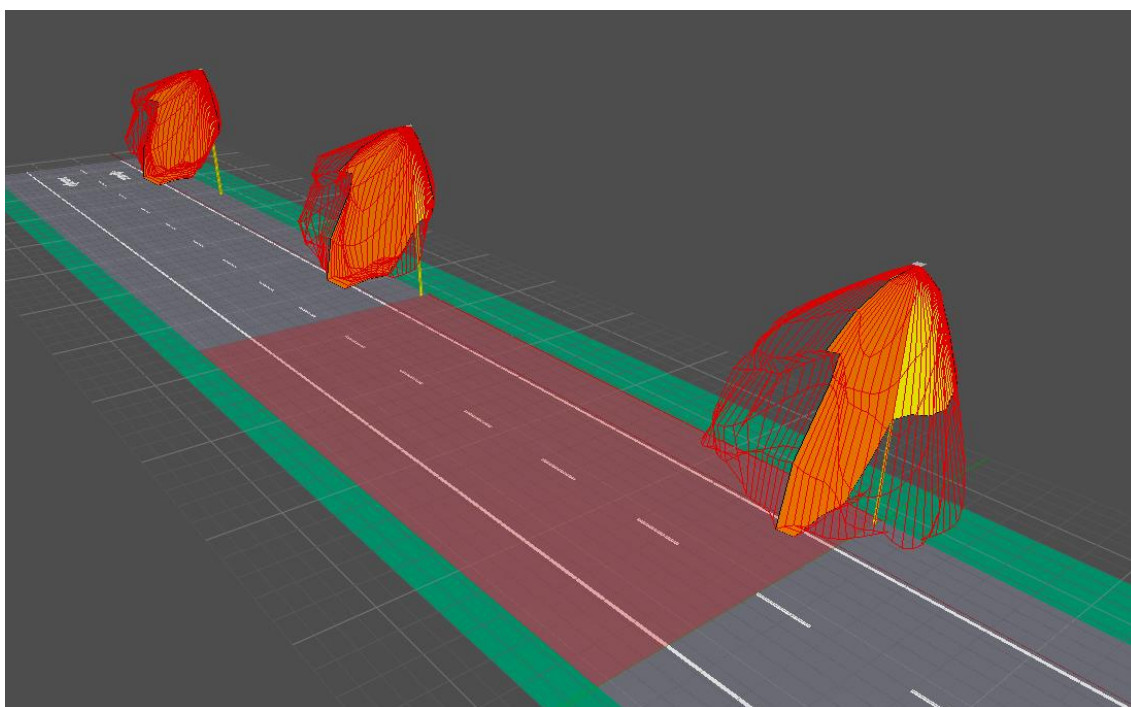
Keďže toto meranie bolo obmedzené len na 3 objektívy, ktoré boli k dispozícii, tak nie možné jasne stanoviť, že objektív 135 mm je najvhodnejší na zisťovanie prahového prírastku. Pri rozsiahlejšom teste by sa mohlo ukázať, že existuje vhodnejší objektív, ale toto je zatiaľ len v rovine úvahy. Je potreba brať do úvahy, že čím väčšia bude ohnisková vzdialenosť, tým budú lepšie zachytené vzdialenejšie svetelné zdroje ale naopak do záberu sa ich vojde menej, čo môže výrazne ovplyvniť meranie.

Záverom z tohto experimentálneho merania sú také, že na určenie prahového prírastku podľa normy ČSN EN 13201 je najvhodnejšie využívať objektív 135 mm a zvyšné objektívy majú skôr uplatnenie pri meraní na kratšie vzdialenosti.



## 6.5 Simulácia

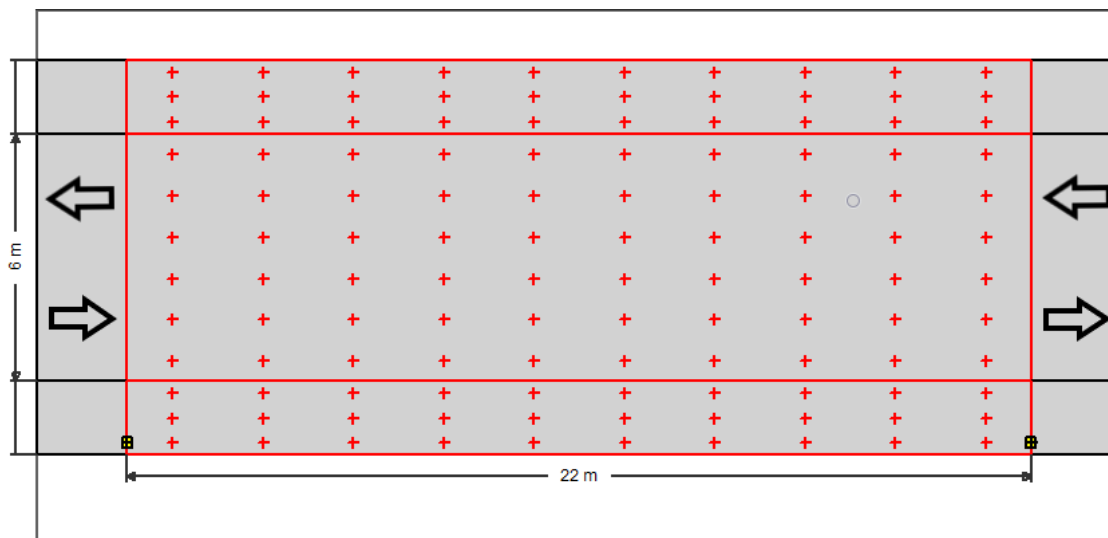
Jednou z možností ako si overiť namerané dáta je vytvorenie simulácie danej osvetľovacej sústavy. Pre tieto účely sa používa program Relux, v ktorom je možné zo simulácie získať hodnoty oslnenia pre vymedzenú meraciu oblasť. Celý postup simulácie prebieha na základe normy ČSN EN 13201, takže sa zhoduje s postupom voleným pri praktickom meraní. Od výrobcu inštalovaných svietidiel bol získaný model svietidla, ktorý bol následne vložený do programu, takže všetky parametre sú zhodné s meranými svietidlami. Na obr. 6.7 je možno vidieť ukážku zo simulácie v programe Relux a C-roviny svietidiel s priestorovým modelom.



Obr. 6.7: Ukážka zo simulácie v programe Relux.

Na obrázku je znázornené umiestnenie meracieho poľa na komunikácii v programe a jednotlivé body merania. Program spočítal hodnoty priemerného jasu vozovky a prahového prírastku v oboch jazdných pruhoch, a na oboch chodníkoch pre chodcov, avšak z hľadiska porovnania je zaujímavý len jeden jazdný pruh (bližšie k svietidlám).

Na obrázku sú vidieť výsledky zo simulácie s vyznačeným riadkom, ktorý reprezentuje jazdný pruh, v ktorom bolo robené praktické meranie. Z výsledkov je vidieť, že prahový prírastok tejto osvetľovacej sústavy je nulový a priemerný jas komunikácie je len tesne nad minimálnou hodnotou udávanou normou. Pri porovnaní s výsledkami z praktického merania (*kapitola 6.2.1*) je vidieť veľký rozdiel, ktorý je spôsobený vplyvom rôznych svetelných zdrojov, ktoré nepatria do meraného svetelného radu, ale podieľajú sa na osvetľovaní svojho okolia.



Obr. 6.8: Meracie pole v programe Relux.



Názov svietidla : Produkt  
Osadenie : 1 x HIE (Clear) 150W 166 W / 11400 lm

#### Pouličné osvetlenie

Umiestnenie svietidla	: Pravý rad	Činiteľ údržby	: 0.80
Rozmiestnenie svietidiel	: 22.00 m	Výška (fot. centrum)	: 6.90 m
Presah svietidiel	: -1.50 m	Sklon	: 0.00 °
Abs. position	: -1.50 m	Trieda oslnenia	: D2
Výkon/km	: 7545 W/km	Trieda intenzity svetla	: G*1

#### Cesta

Šírka	: 6.00 m	Jazdné pruhy	: 2
Plochy	: R3, q0=0.07	Povrch (mokrý)	: -none-, q0=0.1

#### Jas

Pole výpočtu: 22m x 6m (10 x 6 Body)

Pozorovateľ

2 : x=82.00m, y=4.50m, z=1.50m

1 : x=-60.00m, y=1.50m, z=1.50m

Lane	$\bar{L}_m$	$U_o$	$U_l$	$T_l$	$Re_i$
2:(y=4.50)	0.59 cd/m <sup>2</sup>	0.21	0.16	0	0.52
1:(y=1.50)	0.58 cd/m <sup>2</sup>	0.20	0.09	0	0.71
M5	$\geq 0.50$ cd/m <sup>2</sup>	$\geq 0.35$	$\geq 0.40$	$\leq 15$	$\geq 0.30$

#### svetlenosť

Pole výpočtu: 22m x 6m (10 x 6 Body)

$\bar{E}_m$	$E_{min}$	$U_o$	$U_d$
16.9 lx	1.91 lx	0.11	0.04

Obr. 6.9: Výsledná správa zo simulácie.



Po bližšej analýze výsledkov z merania a zo simulácie (obr. 6.9) bol preskúmaný dôvod, prečo simulácia ukazuje nulovú hodnotu prahového prírastku. Skúmaním daného problému bolo zistené, že výrobca daných svietidiel vo svojich materiáloch [14] jasne popisuje, že tento druh svietidla je vhodný na osvetľovanie cestičiek, parkovísk alebo športových plôch. Svietidlo nie je vhodné na osvetľovanie verejnej komunikácii z čoho vyplýva, že pri návrhu osvetľovacej sústavy na danom mieste došlo k chybnému zvoleniu svietidiel. Samotný rad svietidiel podľa výsledkov simulácie nevyhovuje normatívnym požiadavkám na minimálnu hodnotu celkovej rovnomernosti jasov povrchu komunikácie  $U_0$  a taktiež nevyhovuje na minimálnu hodnotu pozdĺžnej rovnomernosti  $U_L$ .

Do úvahy treba brať fakt, že v realite sa na osvetľovanie daného úseku nepodielajú len projektovaný rad svietidiel, ale aj svietidlá v blízkom okolí popísané v kapitole 5.4. To však nemení nič na tom, že na túto verejnú osvetľovaciu sústavu boli použité nesprávne svietidlá.

## 7. ZÁVER

### 7.1 Závery práce

Úvodná kapitola tejto diplomovej práce sa venovala popisu základným svetelno-technických veličín. Každá veličina bola v stručnosti popísaná, bližšie priblížená pomocou obrázku a bol popísaný spôsob výpočtu danej veličiny. Táto časť tvorila teoretický základ a nevyhnutné poznatky pre ďalšie časti práce.

Nasledujúca časť bola zameraná na ľudské oko a to ako pomocou neho vnímame svetlo. Pri tvorbe tejto kapitoly sa vychádzalo z odbornej literatúry z oblasti medicíny ale aj z literárnych prameňov týkajúcich sa svetelnej techniky. Dôležitým poznatkom z tejto rešeršnej časti je to, že ľudské oko, konkrétne gangliové bunky, ktoré sa v ňom nachádzajú využívajú na vnímanie svetla tzv. receptívne polia. Tieto polia spracovávajú informácie o veľkosti a intenzite svetelného podnetu, čo priamo súvisí s oslnením. Ďalším zistením bolo, že ľudské oko (receptívne polia) reaguje oveľa citlivejšie na okrajové časti svetla dopadajúceho zo svetelného zdroja a naopak stredová časť je potlačená.

Záver rešeršnej časti bol venovaný problematike týkajúcej sa oslneniu. Oslnenie bolo teoreticky popísané a následne rozdelené do jednotlivých kategórií. Bližšie priblížená bola oblasť zaoberajúca sa výpočtom oslnenia v exteriéroch. Konkrétnejšie oblasť venujúca sa výpočtu prahového prírastku na komunikáciách. Na čo nadväzovala praktická časť tejto diplomovej práce.

V praktickej časti tejto diplomovej práce bolo urobené experimentálne meranie exteriérovej osvetľovacej sústavy a následný výpočet hodnoty prahového prírastku na komunikácii. Meranie bolo prevedené pomocou 3 rôznych objektívov a celkovo boli využité 4 spôsoby snímania scény. Objektív 135 mm bol zvolený ako referenčný, objektív 50 mm bol využitý na meranie *landscape* a *portrait*, a posledný využitý bol objektív 4,5 mm. Výsledky z tohto merania sú vidieť v tabuľke v príloha 1. Pri spracovaní práce bolo zvolené jedno meracie miesto, ktoré bolo popísané z hľadiska výsledkov pre každý objektív samostatne a doplnené výslednými HDR fotografiami, čo je možno vidieť v *kapitolách* 6.2.1, 6.2.2 a 6.2.3. Následne bolo urobené porovnanie objektívov vzhľadom k referenčnému, viď *kapitola* 6.4.

Na záver bola prevedená simulácia meranej osvetľovacej sústavy, z ktorej bolo zistené, že pri návrhu danej osvetľovacej sústavy bol zvolený nesprávny typ svietidla. Osvetľovacia sústava by bez okolitých svietidiel nespĺňovala normatívne požiadavky.

## **7.2 Návrh ďalšieho pokračovania**

Zvolený úsek merania už od začiatku vykazoval známky toho, že tam nedochádza k prekročovaniu maximálnej dovolenej hodnoty prahového prírastku. Tento predpoklad potvrdili aj výsledky merania. Nadviazaním na túto prácu by mohlo byť meranie úseku, ktorý na prvý pohľad vykazuje jasné známky prekročenia limitných hodnôt prahového prírastku.

Rozšírením tejto práce by taktiež mohlo byť využitie iných druhov objektívov na meranie, než boli použité v tejto práci. Ak to bude možné, tak zvoliť objektívy s ohniskom väčším ako 50 mm a zároveň menším ako 135 mm. Ďalším bodom, ktorým by sa dalo nadviazať na túto prácu je vyriešenie automatického zameriavania meracej oblasti, keďže pri tejto práci bolo potrebné vkladať meracie pole manuálne.

## POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] HABEL, Jiří, Karel DVOŘÁČEK, Vladimír DVOŘÁČEK a Petr ŽÁK. SVĚTLO A OSVĚTLOVÁNÍ. Praha: FCC Public, 2013. ISBN 978-80-86534-21-3.
- [2] Rušivé oslnění při osvětlení vnitřních prostorů. TNI 36 0450. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [3] MUSZKOVÁ, Veronika. FYZIOLOGICKÉ A PSYCHOLOGICKÉ PRINCÍPY ZRAKOVEJ PERCEPCIE [online]. Brno, 2010 [cit. 2020-11-30]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/th/72057/lf\\_m/fyziologicke\\_a\\_psychologicke\\_principy\\_zrakovej\\_percepcie.pdf](https://is.muni.cz/th/72057/lf_m/fyziologicke_a_psychologicke_principy_zrakovej_percepcie.pdf). Diplomová práce. Masarykova Univerzita. Vedoucí práce Doc. MUDr. Svatopluk Synek, CSc.
- [4] VAN BOMMEL, Wout. Interior Lightning Fundamentals, Technology and Application. Londýn: Springer, 2019. ISBN 978-3-030-17195-7.
- [5] SHINING, Ma, Yang YANG, Luo Ronier MING a Liu XIAOYU. Assessing and Modeling Discomfort Glare for Raw White LEDs with Different Patterns. Leukos [online]. 2016, 2017(13), 59-70 [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15502724.2016.1252683>
- [6] GLARINGLY OBVIOUS? - UGR AND EN 12464-1 FOR OFFICES. In: Robus [online]. Dublin: LED Group, 2019 [cit. 2020-11-05]. Dostupné z: <https://robus.com/news/news-article/glaringly-obvious-ugr-and-en-12464-1-for-offices>
- [7] BENCKO, Vladimír. Hygiena : Učební texty k seminářům a praktickým cvičením. 2. přepracované a doplněné vydání. Praha: Karolinum, 2002. ISBN 80-7184-551-5.
- [8] JUPP, Ethan. How to use fog lights. In: Motoring Research [online]. Velká Británie, 2019 [cit. 2020-11-05]. Dostupné z: <https://www.motoringresearch.com/advice/how-to-use-fog-lights/>
- [9] Směrnice pro veřejné zakázky a návrh veřejného osvětlení. In: Energy Agency [online]. Viedeň: Austrian Energy Agency, 2017 [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: [http://www.premiumlight.cz/fileadmin/cz/pdf/CS\\_outdoor-cs-guidelines.pdf](http://www.premiumlight.cz/fileadmin/cz/pdf/CS_outdoor-cs-guidelines.pdf)
- [10] PORSCHE, Tobias, Andreas WALKLING, Franz SCHMIDT a Christoph SCHIERZ. MEASUREMENT OF THE THRESHOLD INCREMENT (TI) IN ROAD LIGHTING BASED ON USING ILMD. TechnoTeam [online]. 2015 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: [https://www.technoteam.de/product\\_overview/photometer\\_colorimeter/publication/ISBN%20978-3-902842-49-7](https://www.technoteam.de/product_overview/photometer_colorimeter/publication/ISBN%20978-3-902842-49-7)
- [11] ČSN EN 13201-3. Osvětlování pozemních komunikací - Část 3: Výpočet. Brusel: CEN, 2015.
- [12] ROTREKL, M. Hodnocení oslnění vnitřních a venkovních osvětlovacích soustav. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 67 s. Vedoucí diplomové práce Jan Škoda.

- [13] LDA - LumiDISP. In: LumiDISP [online]. Brno [cit. 2021-03-13]. Dostupné z:  
[http://www.lumidisp.eu/wp-content/uploads/2018/03/LumiDISP\\_LDA\\_overview\\_cz.pdf](http://www.lumidisp.eu/wp-content/uploads/2018/03/LumiDISP_LDA_overview_cz.pdf)
- [14] *Mustang Small Area lighting luminaire - Conventional* [online]. Oregon: Ligman [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://old.ligman.com/conventional/street-area-luminaires/mustang-small-area-lighting-luminaire-conventional>

# PRÍLOHY

Príloha 1: Tabuľka výsledných hodnôt z merania na ulici Technická

Poloha	Objektív	$L_{voz}$ [cd.m <sup>-2</sup> ]	$L_v$ [cd.m <sup>-2</sup> ]			$f_{\pi}$ [%]		
			23 rokov	60 rokov	70 rokov	23 rokov	60 rokov	70 rokov
Miesto 1 (0 m)	135mm	0,3628	1,77E-02	2,91E-02	3,91E-02	2,5930	4,2604	5,7135
	50mm (landscape)	0,8377	2,08E-02	3,01E-02	3,91E-02	1,5555	2,2579	2,9280
	50mm (portrait)	0,2029	4,82E-03	7,92E-03	1,06E-02	1,1232	1,8455	2,4749
	4,5mm (Fish Eye)	0,3515	7,52E-06	1,24E-05	1,66E-05	0,0011	0,0019	0,0025
Miesto 2 (11 m)	135mm	0,6697	2,50E-02	3,40E-02	4,19E-02	2,2379	3,0468	3,7517
	50mm (landscape)	0,5141	7,09E-03	1,16E-02	1,56E-02	0,7844	1,2888	1,7283
	50mm (portrait)	0,5040	8,97E-03	1,46E-02	1,95E-02	1,0089	1,6388	2,1877
	4,5mm (Fish Eye)	0,4787	1,64E-05	2,69E-05	3,61E-05	0,0019	0,0032	0,0042
Miesto 3 (22 m)	135mm	0,4236	1,24E-02	1,80E-02	2,29E-02	1,6038	2,3272	2,9577
	50mm (landscape)	0,3843	1,95E-03	3,21E-03	4,30E-03	0,2728	0,4482	0,6010
	50mm (portrait)	0,5068	3,78E-02	5,95E-02	7,84E-02	4,2287	6,6586	8,7760
	4,5mm (Fish Eye)	0,5853	8,91E-04	1,10E-03	1,28E-03	0,0889	0,1097	0,1278
Miesto 4 (33 m)	135mm	0,3014	7,82E-02	9,54E-02	1,10E-01	13,2724	16,1920	18,7364
	50mm (landscape)	0,2731	5,61E-03	9,10E-03	1,21E-02	1,0305	1,6710	2,2292
	50mm (portrait)	0,2937	1,68E-02	2,51E-02	3,23E-02	2,9048	4,3460	5,6019
	4,5mm (Fish Eye)	0,4438	4,16E-06	6,84E-06	9,17E-06	0,0005	0,0009	0,0011
Miesto 5 (44 m)	135mm	0,8159	3,25E-02	4,34E-02	4,84E-02	2,4876	3,3199	3,7024
	50mm (landscape)	0,8009	6,51E-03	1,06E-02	1,40E-02	0,5058	0,8214	1,0865
	50mm (portrait)	0,7098	1,01E-02	1,55E-02	1,94E-02	0,8651	1,3279	1,6559
	4,5mm (Fish Eye)	0,7346	9,62E-03	1,08E-02	1,19E-02	0,8007	0,8999	0,9864
Miesto 6 (55 m)	135mm	1,3196	1,95E-02	2,84E-02	3,62E-02	1,0163	1,4798	1,8838
	50mm (landscape)	1,2799	1,65E-02	2,52E-02	3,28E-02	0,8815	1,3468	1,7522
	50mm (portrait)	1,4535	1,82E-02	2,73E-02	3,53E-02	0,8748	1,3170	1,7024
	4,5mm (Fish Eye)	0,8764	6,72E-04	8,22E-04	9,52E-04	0,0485	0,0594	0,0688
Miesto 7 (66 m)	135mm	1,2758	8,35E-03	1,37E-02	1,84E-02	0,4469	0,7342	0,9847
	50mm (landscape)	1,4054	7,02E-03	1,15E-02	1,55E-02	0,3477	0,5712	0,7661
	50mm (portrait)	1,3225	2,39E-02	3,61E-02	4,68E-02	1,2412	1,8765	2,4301
	4,5mm (Fish Eye)	1,1293	7,39E-05	1,21E-04	1,63E-04	0,0044	0,0072	0,0096

Pokračovanie tabuľky z prílohy 1.

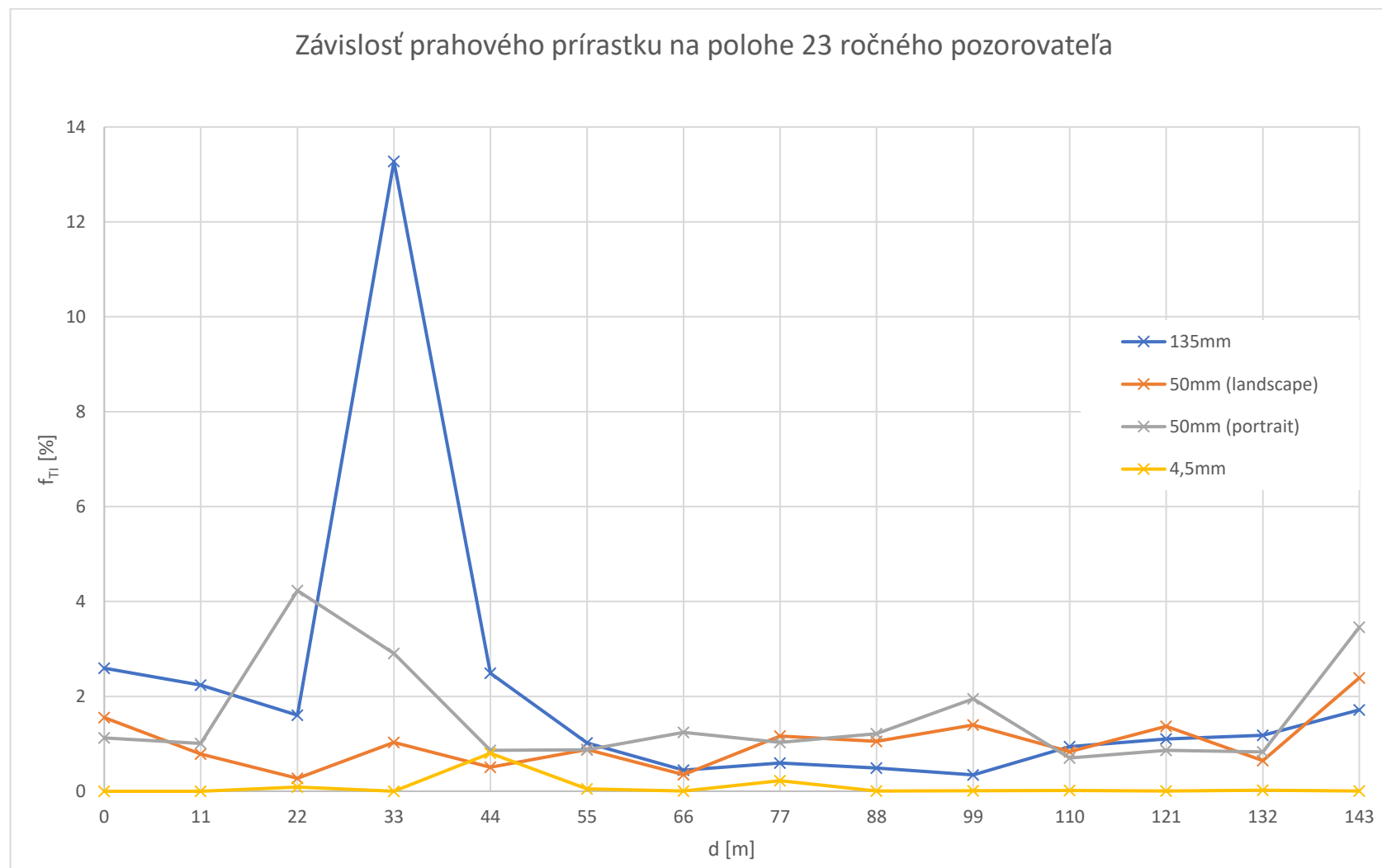
Poloha	Objektív	$L_{voz}$ [cd.m <sup>-2</sup> ]	$L_v$ [cd.m <sup>-2</sup> ]			$f_{\Pi}$ [%]		
			23 rokov	60 rokov	70 rokov	23 rokov	60 rokov	70 rokov
Miesto 8 (77 m)	135mm	0,9855	9,01E-03	1,48E-02	1,99E-02	0,5927	0,9738	1,3059
	50mm (landscape)	1,0545	1,87E-02	2,81E-02	3,64E-02	1,1624	1,7534	2,2685
	50mm (portrait)	1,1171	1,73E-02	2,62E-02	3,39E-02	1,0285	1,5558	2,0152
	4,5mm (Fish Eye)	1,0122	3,49E-03	3,82E-03	4,11E-03	0,2244	0,2458	0,2644
Miesto 9 (88 m)	135mm	0,9030	6,92E-03	1,14E-02	1,53E-02	0,4882	0,8021	1,0757
	50mm (landscape)	0,9529	1,55E-02	2,52E-02	3,37E-02	1,0500	1,7046	2,2750
	50mm (portrait)	0,9951	1,86E-02	2,81E-02	3,65E-02	1,2112	1,8361	2,3807
	4,5mm (Fish Eye)	0,8465	6,83E-05	1,12E-04	1,50E-04	0,0051	0,0083	0,0112
Miesto 10 (99 m)	135mm	1,0848	5,67E-03	9,31E-03	1,25E-02	0,3451	0,5670	0,7604
	50mm (landscape)	1,0683	2,27E-02	3,70E-02	4,94E-02	1,3971	2,2794	3,0483
	50mm (portrait)	1,0748	3,18E-02	4,90E-02	6,40E-02	1,9500	3,0073	3,9287
	4,5mm (Fish Eye)	0,7469	1,11E-04	1,82E-04	2,44E-04	0,0091	0,0149	0,0200
Miesto 11 (110 m)	135mm	1,1299	1,60E-02	2,28E-02	2,88E-02	0,9406	1,3442	1,6959
	50mm (landscape)	1,1271	1,41E-02	2,29E-02	3,06E-02	0,8354	1,3551	1,8081
	50mm (portrait)	1,1288	1,19E-02	1,93E-02	2,58E-02	0,7017	1,1387	1,5196
	4,5mm (Fish Eye)	0,7561	1,74E-04	2,85E-04	3,83E-04	0,0141	0,0232	0,0311
Miesto 12 (121 m)	135mm	0,8912	1,54E-02	2,21E-02	2,79E-02	1,1000	1,5737	1,9866
	50mm (landscape)	0,9148	1,96E-02	3,18E-02	4,24E-02	1,3666	2,2195	2,9628
	50mm (portrait)	0,9515	1,28E-02	2,05E-02	2,72E-02	0,8630	1,3842	1,8384
	4,5mm (Fish Eye)	1,0176	7,55E-05	1,24E-04	1,66E-04	0,0048	0,0080	0,0107
Miesto 13 (132 m)	135mm	0,6661	1,31E-02	1,90E-02	2,41E-02	1,1777	1,7084	2,1708
	50mm (landscape)	0,6028	6,64E-03	1,09E-02	1,46E-02	0,6471	1,0632	1,4258
	50mm (portrait)	0,5564	7,98E-03	1,27E-02	1,68E-02	0,8296	1,3196	1,7465
	4,5mm (Fish Eye)	0,4845	1,81E-04	2,98E-04	3,99E-04	0,0210	0,0345	0,0463
Miesto 14 (143 m)	135mm	0,3751	1,21E-02	1,98E-02	2,66E-02	1,7164	2,8201	3,7819
	50mm (landscape)	0,3204	1,48E-02	2,38E-02	3,17E-02	2,3902	3,8478	5,1180
	50mm (portrait)	0,3898	2,50E-02	3,61E-02	4,58E-02	3,4544	4,9876	6,3237
	4,5mm (Fish Eye)	0,3201	3,23E-05	5,31E-05	7,12E-05	0,0052	0,0086	0,0115

Príloha 2: Tabuľka vypočítaných odchýlok hodnoty prahového prírastku

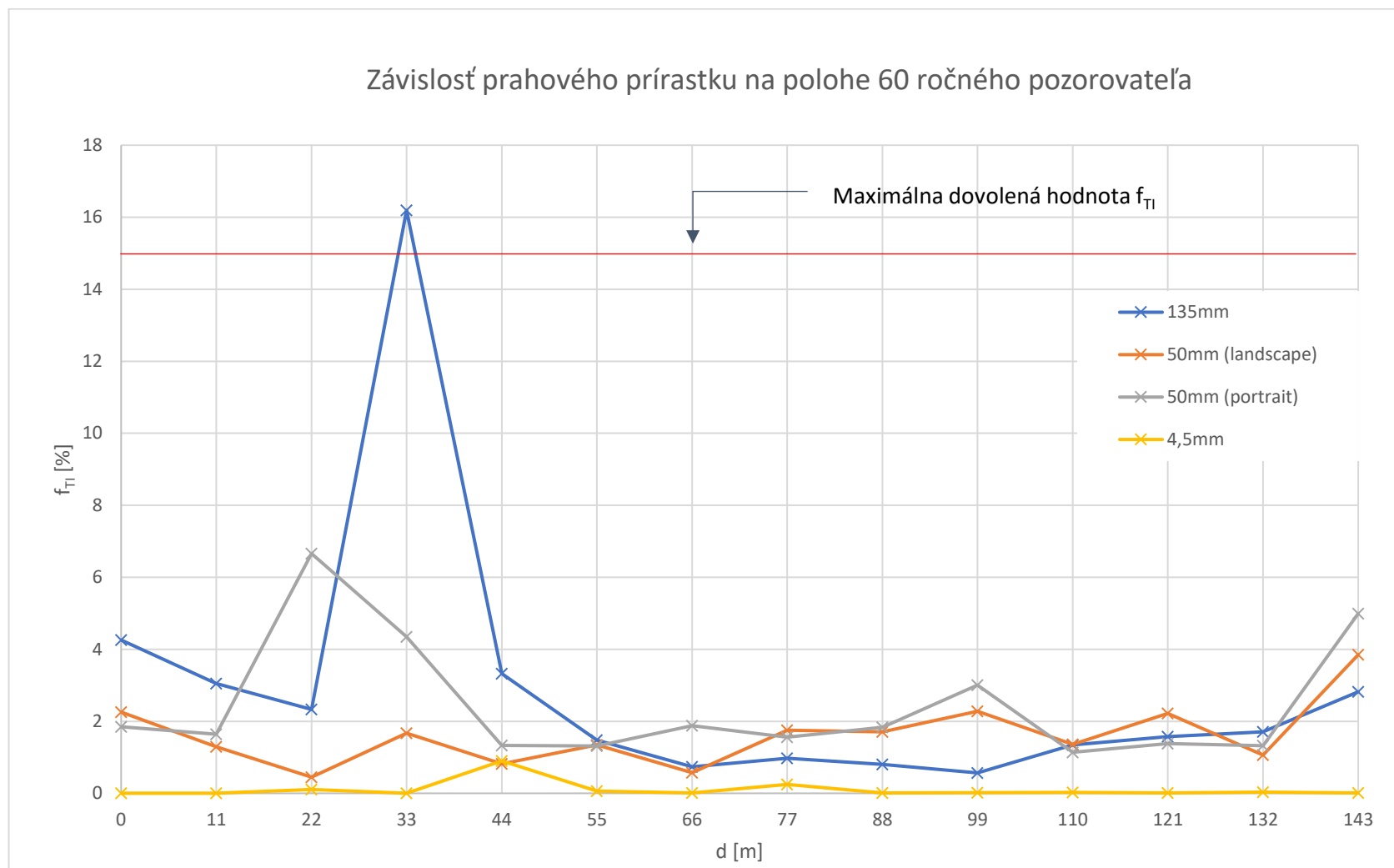
Poloha	Objektív	Odchýlka [%]			Poloha	Odchýlka [%]		
		23 rokov	60 rokov	70 rokov		23 rokov	60 rokov	70 rokov
Miesto 1 (0 m)	135mm	Referencia			Miesto 8 (77 m)	Referencia		
	50mm (landscape)	40,01	47,00	48,75		96,13	80,06	73,71
	50mm (portrait)	56,68	56,68	56,68		73,54	59,76	54,31
	4,5mm (Fish Eye)	99,96	99,96	99,96		62,14	74,76	79,75
Miesto 2 (11 m)	135mm	Referencia			Miesto 9 (88 m)	Referencia		
	50mm (landscape)	64,95	57,70	53,93		115,09	112,51	111,50
	50mm (portrait)	54,92	46,21	41,69		148,11	128,92	121,32
	4,5mm (Fish Eye)	99,91	99,90	99,89		98,96	98,96	98,96
Miesto 3 (22 m)	135mm	Referencia			Miesto 10 (99 m)	Referencia		
	50mm (landscape)	82,99	80,74	79,68		304,85	302,01	300,89
	50mm (portrait)	163,67	186,12	196,72		465,08	430,40	416,69
	4,5mm (Fish Eye)	94,46	95,29	95,68		97,36	97,36	97,36
Miesto 4 (33 m)	135mm	Referencia			Miesto 11 (110 m)	Referencia		
	50mm (landscape)	92,24	89,68	88,10		11,19	0,82	6,62
	50mm (portrait)	78,11	73,16	70,10		25,40	15,28	10,40
	4,5mm (Fish Eye)	100,00	99,99	99,99		98,50	98,27	98,16
Miesto 5 (44 m)	135mm	Referencia			Miesto 12 (121 m)	Referencia		
	50mm (landscape)	79,67	75,26	70,65		24,24	41,04	49,14
	50mm (portrait)	65,22	60,00	55,28		21,55	12,04	7,46
	4,5mm (Fish Eye)	67,81	72,89	73,36		99,56	99,49	99,46
Miesto 6 (55 m)	135mm	Referencia			Miesto 13 (132 m)	Referencia		
	50mm (landscape)	13,26	8,99	6,99		45,06	37,77	34,32
	50mm (portrait)	13,92	11,00	9,63		29,56	22,76	19,54
	4,5mm (Fish Eye)	95,23	95,99	96,35		98,21	97,98	97,87
Miesto 7 (66 m)	135mm	Referencia			Miesto 14 (143 m)	Referencia		
	50mm (landscape)	22,20	22,20	22,20		39,26	36,44	35,33
	50mm (portrait)	177,75	155,57	146,79		101,26	76,86	67,21
	4,5mm (Fish Eye)	99,02	99,02	99,02		99,70	99,70	99,70



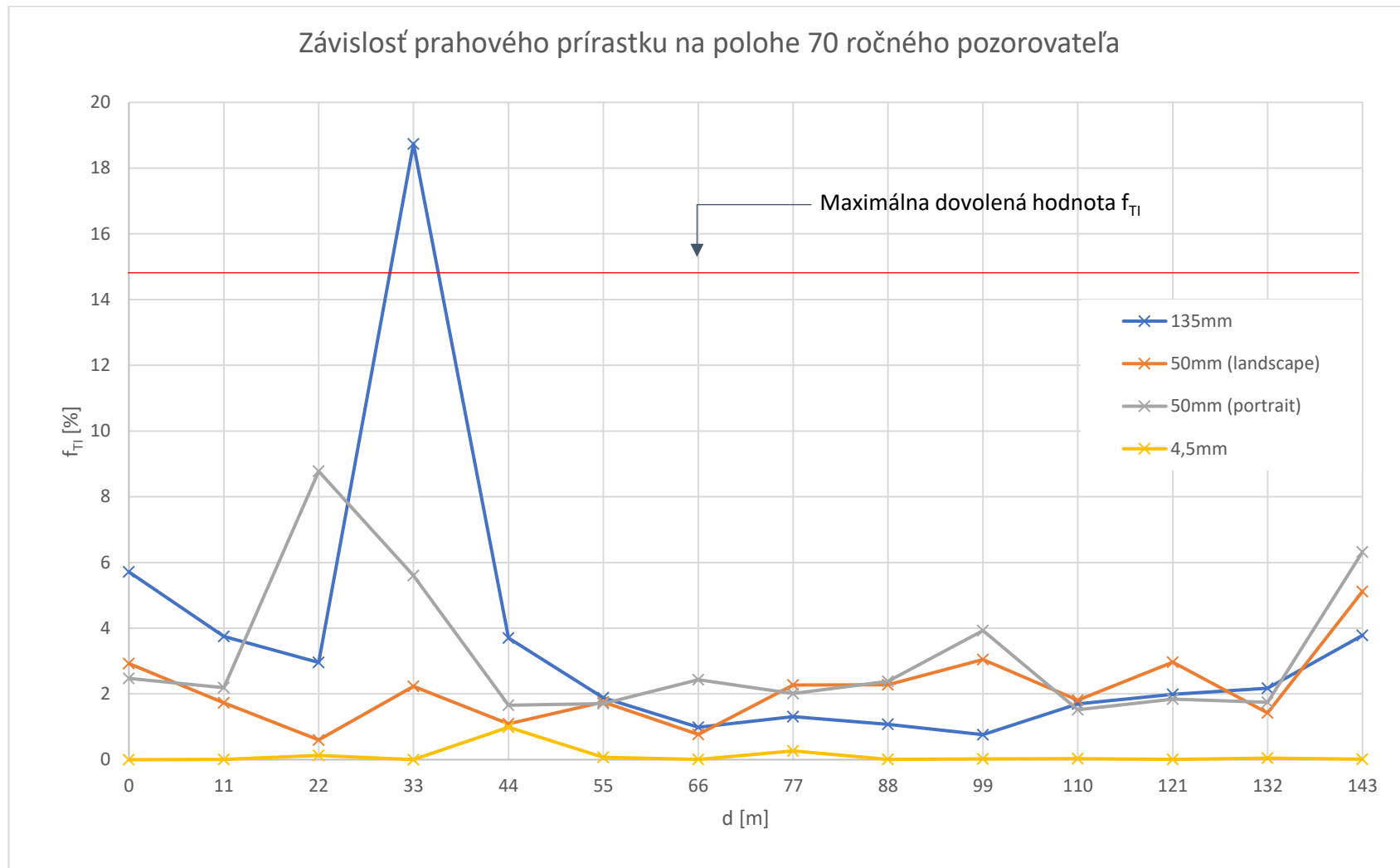
Príloha 3: Graf závislosti prahového prírastku na polohe 23 ročného pozorovateľa



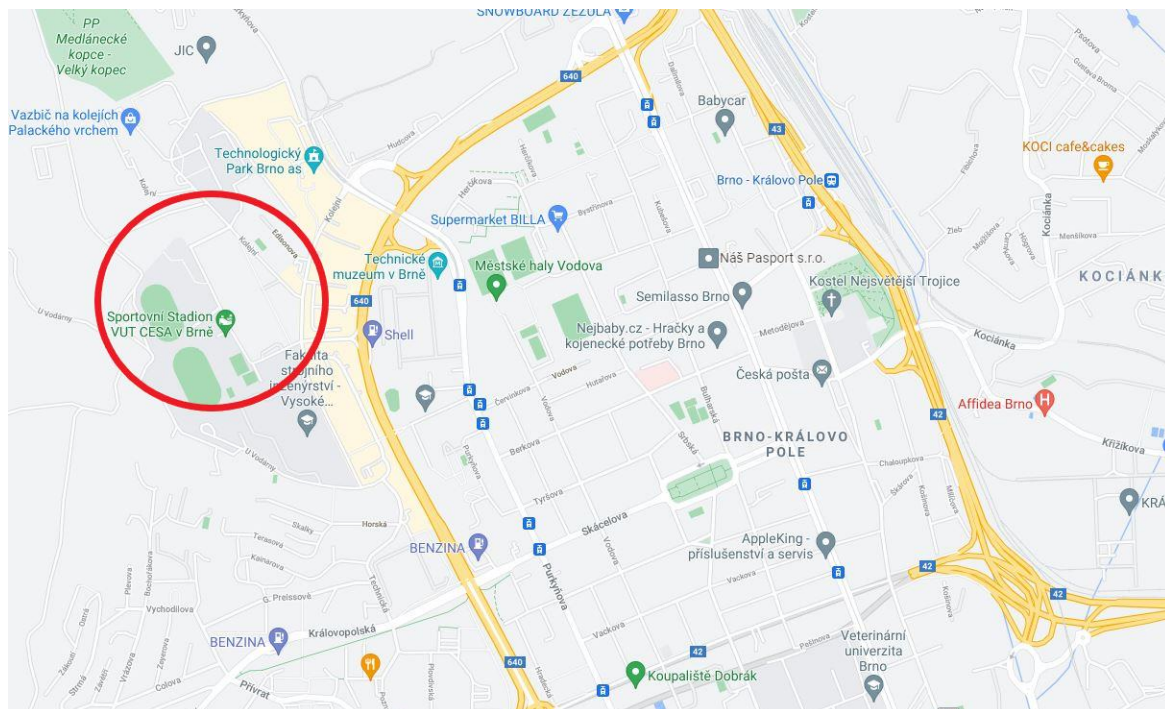
Príloha 4: Graf závislosti prahového prírastku na polohe 60 ročného pozorovateľa



Príloha 5: Graf závislosti prahového prírastku na polohe 70 ročného pozorovateľa



Príloha 6: Lokalita meraného úseku ulice Technická



## Príloha 7: Vyznačenie meraného úseku a smeru merania

